



Contrôle cognitif, assistance à la conduite et coopération homme-machine : le maintien sur une trajectoire acceptable et sécurisée

Mathieu Deroo

► To cite this version:

Mathieu Deroo. Contrôle cognitif, assistance à la conduite et coopération homme-machine : le maintien sur une trajectoire acceptable et sécurisée. Psychologie. Université Rennes 2, 2012. Français. NNT : 2012REN20028 . tel-00730507

HAL Id: tel-00730507

<https://theses.hal.science/tel-00730507>

Submitted on 10 Sep 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THESE de l'Université de Rennes 2
sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne
pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE RENNES 2
Mention : Psychologie Ergonomique
Ecole doctorale Sciences Humaines et Sociales

présentée par
Mathieu DEROO
Préparée à l'IRCCyN, CNRS, Nantes

Contrôle cognitif, assistance à la conduite et Coopération Homme-Machine : le maintien sur une trajectoire acceptable et sécurisée

Thèse soutenue le 06 juin 2012
devant le jury composé de :

Jean-Marc BLOSSEVILLE
Directeur de recherche IFSTTAR, Satory / *examineur*

Jean-Michel HOC
Directeur de recherche CNRS, Nantes / *Directeur de thèse*

Eric JAMET
Professeur, Université de Rennes 2 / *examineur*

Franck MARS
Chargé de recherche CNRS, Nantes / *Co-encadrant de thèse*

Agnès VAN DAELE
Professeur, Université de Mons-Hainaut / *rapporteur*

Jean-Louis VERCHER
Directeur de recherche CNRS, Aix-Marseille / *rapporteur*

À Corentin et Louane

Ce travail de thèse a fait l'objet de quatre articles dont un publié, deux soumis dans des revues internationales et un article en préparation. Ces articles sont présentés dans les chapitres 5 à 8 et correspondent au corps expérimental de notre travail.

Chapitre 8. Deroo, M., Charron, C., Hoc, J.M. & Mars, F. (en préparation). Contrôle partagé du volant et conséquences sur les mécanismes adaptatifs.

Article 5. Deroo M., Hoc J.M., & Mars F. (en révision). Des facteurs de risque aux styles de conduite : une synthèse de la littérature.

Remerciements

Ce travail de thèse ne s'est pas fait sans discussion, sans soutien, sans amitié, et je tiens à remercier tous ceux qui de près ou de loin ont rendu ce travail possible.

Je tiens à remercier tout particulièrement Jean-Michel Hoc, mon directeur de thèse pour tout ce qu'il m'a apporté et permis d'accomplir. La liberté de travail qu'il m'a donnée dès le début de cette aventure ainsi que son ouverture d'esprit à toute nouvelle idée ont été plus que précieuses dans notre collaboration. Plus que tout je le remercie de m'avoir permis de réfléchir sur bien des aspects de la recherche en général et de sa pratique quotidienne. Enfin, merci pour ces moments partagés à Leeds à déguster les *so british fish-and-chips*.

Je remercie tout aussi chaleureusement Franck Mars pour l'encadrement sans faille dont j'ai pu bénéficier, pour le soutien lors des débuts difficiles sur le simulateur ou sur Matlab®, pour le colloque réalisé ensemble à Berlin et le prochain à San Francisco, et bien sûr pour la découverte des Comics.

Un très grand merci à mes rapporteurs Jean-Louis Vercher et Agnès Van Daele pour avoir accepté de réaliser une lecture attentive et pointue de ce manuscrit. Merci de l'intérêt que vous portez à ce travail. Je remercie également très chaleureusement Eric Jamet et Jean-Marc Blosseville de m'avoir fait l'honneur de participer à mon jury de thèse.

Cette thèse a été réalisée dans l'Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes (IRCCyN) et je tiens donc à remercier son directeur, Michel Malabre, ainsi que les personnes nous permettant d'y travailler dans d'excellentes conditions. Merci à Patricia Brière pour toute l'aide apportée au quotidien. Merci également aux ingénieurs du laboratoire pour leurs conseils et leur soutien : Robert Boisliveau pour l'initiation à Matlab® et Robert Legal pour la création de questionnaires en ligne.

Je remercie également les membres de l'équipe PsyCotec pour leurs conseils et encouragements, irréductibles gaulois psycho-ergonomes au sein de tous ces ingénieurs qui forment l'IRCCyN : Ilja Frissen, Isabelle Milleville et Céline Prévost. Merci à Clément Guerin pour ces longues discussions sur ma thèse, sur la tienne et sur le sens à donner à tout ça. Merci à Camilo Charron pour l'aventure que fut la réalisation à deux d'une expérimentation sur le simulateur. Merci à Louay Saleh et Anthony Jubien d'avoir partagé plus qu'un bureau et d'avoir refait le monde avec moi, tant de fois durant cette thèse.

Je remercie Vincent Kocher de OKTAL qui m'a bien aidé à dompter un simulateur de conduite souvent – tout le temps ? – récalcitrant. Merci à toutes les personnes qui ont donné du temps – à la Science ? – en acceptant de passer sur mes expériences pas toujours confortables pour elles.

Je tiens également à remercier chaleureusement toute ma famille, mais surtout mes parents qui m'ont – entre autres – permis de trouver cette voie, et qui m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études. Enfin, les mots me manquent pour remercier la femme de ma vie, Delphine, la mère de mes enfants pour avoir su gérer au quotidien tout ce que réaliser une thèse signifie pour la vie de famille.

Et pour terminer, merci à Corentin et Louane pour tous ces moments de tendresse partagés qui relativisent tellement les choses et à qui je dédie tout ce travail.

Table des matières

CHAPITRE 1 - INTRODUCTION GENERALE.....	1
1.1 LE CONTROLE DE L'ACTIVITE DANS LES ENVIRONNEMENTS DYNAMIQUES AUTOMATISES.....	1
1.2 DOMAINE APPLICATIF : LES ASSISTANCES A LA CONDUITE.....	3
1.3 QUESTIONS DE RECHERCHE ET PLAN DU MEMOIRE	4
1.4 REFERENCES	5
CHAPITRE 2 - LA REGULATION DE L'ACTIVITE EN SITUATION DYNAMIQUE.....	7
2.1 LES MODELES DU CONTROLE COGNITIF DE L'ACTIVITE EN SITUATION DYNAMIQUE.....	7
2.1.1 <i>Les différents niveaux de contrôle cognitif</i>	8
2.1.2 <i>La supervision des automatismes</i>	10
2.1.3 <i>Le compromis cognitif</i>	11
2.2 LA SPECIFICITE DU CONTROLE SENSORI-MOTEUR DANS LE CONTROLE COGNITIF	13
2.2.1 <i>Le rôle des modèles internes dans le contrôle sensori-moteur</i>	14
2.2.2 <i>Le contrôle volontaire du mouvement</i>	15
2.3 LE CONTEXTE DE LA CONDUITE AUTOMOBILE	16
2.3.1 <i>L'environnement dynamique de la conduite automobile</i>	16
2.3.2 <i>Le véhicule</i>	17
2.3.3 <i>Le conducteur</i>	17
2.4 REFERENCES	21
CHAPITRE 3 - LES AUTOMATES ET LEURS EFFETS SUR L'OPERATEUR HUMAIN.....	25
3.1 L'AUTOMATISATION.....	25
3.2 LES STRATEGIES DE CONCEPTION	26
3.2.1 <i>Stratégie centrée sur la machine</i>	26
3.2.2 <i>Stratégie centrée sur l'opérateur humain</i>	27
3.2.3 <i>Stratégie centrée sur le système homme-machine</i>	28
3.2.4 <i>Difficultés misent en avant dans le système homme-machine</i>	29
3.3 LA COOPERATION HOMME-MACHINE EN CONDUITE AUTOMOBILE	30
3.3.1 <i>Articulation entre modes de coopération et fonctionnement cognitif</i>	32
3.4 LES TRAJECTOIRES ACCEPTABLES ET SECURISEES	33
3.4.1 <i>La problématique de l'autorité</i>	33
3.4.2 <i>La problématique de la responsabilité</i>	35
3.5 LES ASSISTANCES ETUDIEES DANS LE CADRE DE CETTE ETUDE.....	35
3.5.1 <i>Intervention ponctuelle : l'amorçage moteur</i>	36
3.5.2 <i>Intervention continue : le contrôle partagé</i>	38
3.6 SYNTHESE DES QUESTIONS DE RECHERCHE.....	41
3.7 REFERENCES	42
CHAPITRE 4 - LES METHODES DE RECHERCHE UTILISEES.....	45
4.1 LES CHOIX METHODOLOGIQUES.....	45
4.2 CONDUITE REELLE OU SIMULATION DE CONDUITE ?	46
4.3 LES TYPES D'OBSERVATIONS REALISEES.....	48
4.3.1 <i>Les critères d'analyse sélectionnés</i>	48
4.3.2 <i>Les données recueillies</i>	49
4.3.3 <i>Les méthodes statistiques utilisées</i>	50
4.4 REFERENCES	50
CHAPITRE 5 - EFFETS DE LA FORCE ET DE LA DIRECTION DE L'AMORÇAGE HAPTIQUE SUR LES CORRECTIONS DE SORTIE DE VOIE	53
5.1 RESUME ETENDU EN FRANÇAIS	53

5.2	INTRODUCTION	57
5.3	METHOD.....	60
5.4	RESULTS.....	63
5.5	DISCUSSION	66
5.6	CONCLUSIONS AND ERGONOMICS RECOMMENDATIONS	68
5.7	REFERENCES	68
CHAPITRE 6 - INFLUENCE DE LA REPRESENTATION DU RISQUE SUR L'AMORÇAGE HAPTIQUE DE CORRECTION DE SORTIE DE VOIE.....		73
6.1	RESUME ETENDU EN FRANÇAIS	73
6.2	INTRODUCTION	77
6.3	METHOD.....	79
6.4	RESULTS.....	82
6.5	DISCUSSION	86
6.6	CONCLUSION.....	88
6.7	REFERENCES	89
CHAPITRE 7 - ANALYSE DE LA COOPERATION HOMME-MACHINE EN FONCTION DU DEGRE DE CONTROLE PARTAGE DU VOLANT.....		93
7.1	RESUME ETENDU EN FRANÇAIS	93
7.2	INTRODUCTION	98
7.3	METHOD.....	102
7.4	RESULTS.....	106
7.5	DISCUSSION AND CONCLUSIONS.....	112
7.6	CONCLUSIONS.....	114
7.7	REFERENCES	114
CHAPITRE 8 - CONTROLE PARTAGE DU VOLANT ET CONSEQUENCES SUR LES MECANISMES ADAPTATIFS.....		117
8.1	OBJECTIF DE L'ETUDE.....	118
8.2	INTRODUCTION	118
8.3	METHODE	124
8.4	RESULTATS.....	127
8.5	DISCUSSION	134
8.6	CONCLUSION.....	137
8.7	REFERENCES	138
CHAPITRE 9 - DISCUSSION GENERALE.....		141
9.1	SYNTHESE DES PRINCIPAUX RESULTATS.....	141
9.1.1	<i>L'intervention ponctuelle : le mode amorçage moteur.....</i>	<i>141</i>
9.1.2	<i>L'intervention continue: le mode de contrôle partagé.....</i>	<i>142</i>
9.1.3	<i>Les recommandations ergonomiques issues de ce travail.....</i>	<i>143</i>
9.2	DISCUSSION SUR LES LIMITATIONS METHODOLOGIQUES	144
9.3	REFERENCES	145
CHAPITRE 10 - CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....		147
10.1	CONCLUSION GENERALE.....	147
10.1.1	<i>La temporalité d'intervention au niveau haptique.....</i>	<i>148</i>
10.1.2	<i>La multiplication des assistances à la conduite</i>	<i>149</i>
10.1.3	<i>Le choix de l'assistance à la conduite ou de l'automatisation de la conduite.....</i>	<i>150</i>
10.2	PERSPECTIVES.....	151
10.3	REFERENCES.....	152
BIBLIOGRAPHIE GENERALE.....		153
ANNEXES.....		162
LISTE DES FIGURES		162
LISTE DES TABLEAUX		164

Chapitre 1 - Introduction générale

« Si le savoir peut créer des problèmes, ce n'est pas l'ignorance qui les résoudra. »

L'univers de la science, 1986, **Isaac Asimov**

SOMMAIRE

- 1.1 Le contrôle de l'activité dans les environnements dynamiques automatisés
 - 1.2 Domaine applicatif : les assistances à la conduite
 - 1.3 Questions de recherche et plan du mémoire
 - 1.4 Références
-

1.1 Le contrôle de l'activité dans les environnements dynamiques automatisés

La complexité des situations allant de pair avec le développement de la technique, le besoin d'adapter la machine à l'homme s'est depuis longtemps fait ressentir. En s'inspirant des recherches menées en psychologie cognitive, telles que celles menées sur la résolution de problème, l'ergonomie des interactions homme machine a produit, et produit toujours, un corpus de connaissance permettant de faciliter cette interaction, de poser les questions liées à l'utilité de la technique, à son utilisabilité ainsi qu'à son acceptabilité. Nous pouvons citer par exemple le cas de l'aide à l'apprentissage procuré par le multimédia (Jamet, Gavota, & Quaireau, 2008) ou encore celui de la navigation dans les hypertextes pour ce qui touche aux dispositifs interactifs (Tricot & Amadiou, 2011).

Toutefois, dans le champ de l'ergonomie, un glissement de paradigme est sans doute nécessaire pour comprendre et adapter les différentes interactions possibles avec des machines autonomes. En effet, l'être humain est amené à interagir avec des dispositifs capables de prendre des décisions en autonomie et d'agir, quelles que soient ses actions. Dans la suite de ce mémoire de thèse nous parlerons donc de coopération homme-machine pour parler de l'interaction entre homme et machine autonome, dans le sens où deux agents autonomes (l'homme et la machine) interagissent dans une même tâche (Hoc, Young & Blosseville, 2009). S'intéresser à la coopération homme-machine signifie donc mettre l'accent

sur le système homme-machine plutôt que sur un seul des deux agents, que ce soit la machine ou l'homme.

Les machines autonomes, ou automates, sont souvent conçues pour agir dans des environnements dynamiques, c'est-à-dire dans des situations dans lesquelles l'opérateur n'a qu'un contrôle partiel sur l'évolution du processus. Lorsque l'automate est conçu pour être une assistance, l'enjeu de coopération homme-machine devient essentiel afin que le système homme-machine atteigne le plus efficacement possible son objectif. Le degré d'automatisation de chacune des fonctions nécessaires à la réalisation de la tâche doit être finement calibré (Parasuraman, Sheridan & Wickens, 2000). Prenons en exemple le cas du régulateur de vitesse, dans les voitures, qui conserve une vitesse précise malgré la pente de la route ou le vent dans l'environnement. Ce n'est plus le conducteur qui agit directement sur la vitesse, mais un automate qui agit pour respecter une consigne de vitesse et agit en permanence pour réguler très efficacement la vitesse. Cette tâche pourrait certainement être réalisée par le conducteur avec une performance sensiblement identique, mais à un coût cognitif trop important pour la situation. Lorsque les automates sont conçus pour être des assistances, comme dans l'exemple précédent, leur objectif est donc de venir en renfort de ce contrôle partiel de l'environnement dynamique. Dans ces situations l'être humain peut, en effet, difficilement atteindre une performance optimale et doit réguler son activité à partir d'un compromis entre plusieurs impératifs, nous parlerons alors de réglage du compromis cognitif. Par exemple, le résultat doit être acceptable du point de vue de la performance mais aussi en fonction du coût de cette performance (Hoc & Amalberti, 2007). Dans la régulation de l'activité, le compromis cognitif est un résultat du contrôle cognitif qui consiste à organiser les perceptions et les actions afin de s'adapter à la situation.

L'étude du contrôle de l'activité en environnements dynamiques est un thème de recherche classique en ergonomie cognitive et d'une certaine façon il en est même fondateur (Hoc, 2004). Des recherches récentes se sont par exemple intéressées aux processus de planification (Van Daele & Carpinelli, 2001) ou encore à la prise de décision dans de tels environnements. (Morel, Amalberti & Chauvin, 2008). L'accroissement de la complexité des systèmes, lié au développement de la technique, a tout d'abord orienté les recherches en ergonomie de la coopération homme-machine vers l'analyse du contrôle symbolique, ou interprétatif, de ces situations. Les chercheurs ont notamment étudié des situations de supervision ou de prise de décision lors de l'intervention d'automates (Amalberti, 1996). Toutefois, si les premiers systèmes automatisés interagissaient essentiellement de façon symbolique avec les opérateurs, le développement croissant de l'automatique, et son intégration de plus en plus poussée dans les activités quotidiennes, et surtout routinières, doit mener la recherche en ergonomie à s'intéresser à la coopération homme-machine en intégrant les différents niveaux de contrôle de l'activité.

Le contrôle cognitif de l'activité implique, en effet, un axe ayant trait au niveau d'abstraction des données utilisées dans le contrôle (Rasmussen, 1986). Cet axe s'étend d'un contrôle symbolique, principalement interprétatif et de haut niveau jusqu'à un contrôle subsymbolique qui intègre les processus perceptivo-moteurs. Un second axe, ayant trait à l'origine des données a été introduit dans le modèle du contrôle cognitif de Hoc & Amalberti (2007), ainsi que l'idée d'un réglage du compromis cognitif à partir de l'idée d'atteinte d'une performance acceptable par rapport à la dynamique de la situation.

D'un point de vue global, c'est cette interaction avec des machines autonomes agissant également à un niveau subsymbolique dans des environnements dynamiques qui fonde le présent projet de recherche. Cette thèse s'inscrivant dans le champ disciplinaire de la psychologie ergonomique, nous synthétiserions donc ce travail comme étant une étude des modifications cognitives et comportementales que ces machines autonomes induisent, lorsque

l'interaction se situe notamment au niveau des processus perceptivo-moteurs, et ceci afin d'adapter au mieux ces machines aux processus mis en jeu. Enfin, en vue de comprendre ces interactions homme-machine autonome, nous aurons une approche centrée sur le système homme-machine et nous nous situerons donc dans le paradigme de la coopération homme-machine.

1.2 Domaine applicatif : les assistances à la conduite

Dans cette recherche nous considérons un domaine applicatif connu de tous, la conduite automobile. Cette activité de notre vie quotidienne commence à changer par l'intégration de technologies de plus en plus poussées. Nous avons donné précédemment l'exemple du régulateur de vitesse, sans doute le plus répandu et le plus médiatisé, mais de nombreux autres systèmes sont conçus dans les laboratoires et par les industriels pour venir assister les conducteurs. Assister est bien le terme, car en partant du constat que le nombre de morts sur la route est difficile à faire diminuer au-delà d'un certain palier, l'idée des ingénieurs est que les machines peuvent aider les humains là où ils sont faillibles, c'est-à-dire dans l'évitement des accidents. Partant du constat que dans le futur proche il ne sera pas possible de totalement automatiser la conduite, du fait de la complexité de l'environnement liée à la gestion du trafic, l'assistance à la conduite se présente donc comme un candidat raisonnable pour participer à la diminution des accidents de la route.

Dans cette thèse nous allons utiliser plus particulièrement deux dispositifs conçus pour aider au maintien dans la voie. Ces deux systèmes interviennent directement sur le volant et interagissent donc avec le conducteur via la modalité haptique. La modalité haptique, ou canal haptique, correspond à l'intégration des informations issues à la fois du toucher, de la proprioception ainsi que du mouvement. En agissant sur le volant ces assistances génèrent des informations qui seront perçues au niveau haptique par les conducteurs. Le guidage du véhicule étant une tâche essentiellement sensori-motrice, l'intervention via ce canal a donc pour but d'agir directement là où se situe le contrôle de la trajectoire, c'est-à-dire directement sur le dispositif de commande. Enfin ces assistances sont conçues pour agir au même niveau que celui auquel se réalise l'essentiel de l'activité, c'est-à-dire le niveau subsymbolique. Cela permet également de ne pas surcharger les autres canaux, tout en permettant la supervision et le contrôle de l'activité (Navarro, Mars & Hoc, 2007).

Le premier dispositif est une assistance à la prévention des sorties de voie, et le second dispositif est une assistance d'aide au maintien dans la voie. Cette distinction tient à la temporalité d'intervention de ces dispositifs. Occasionnelle pour la prévention de sortie de voie et continue pour l'aide au maintien dans la voie.

Le premier dispositif, nommé *amorçage moteur* (*motor priming*) ou encore *amorçage haptique*, intervient sur le volant pour inciter le conducteur à corriger sa trajectoire. Ce dispositif n'intervient que lorsqu'il juge la situation potentiellement risquée, et surtout ne corrige pas lui-même la trajectoire. L'idée de ce système est d'amorcer le geste de correction du conducteur par une action au niveau haptique (oscillation asymétrique du volant), tout en laissant au conducteur le soin d'effectuer lui-même la correction. Cette intervention au niveau subsymbolique est donc censée produire des mouvements de corrections plus rapides et plus efficaces lors de sorties de voie imminentes. Nos recherches sur ce dispositif se centrent sur la contrôlabilité du système, c'est-à-dire la capacité des conducteurs à rester maître de leur véhicule en fonction de la forme du signal d'amorçage (force et sens de l'amorçage) et du diagnostic qu'ils réalisent sur la situation (par exemple : évaluation différente du niveau de risque). Un premier axe de recherche correspondra donc à l'étude du contrôle cognitif de l'activité dans le cadre de la coopération homme-machine lorsque l'intervention haptique est occasionnelle.

Le second dispositif, correspond à une situation de *contrôle partagé* (*shared control*) entre l'homme et la machine. Le dispositif intervient continûment pour aider le conducteur à rester sur la voie en accompagnant la rotation du volant. A la différence de la précédente assistance, ce dispositif corrige en partie lui-même la trajectoire, mais n'est pas conçu pour maintenir tout seul le véhicule dans la voie. C'est donc une correction partielle de la trajectoire couplée à un effet de guidage haptique sur le conducteur qui est produit. L'idée du guidage haptique est d'aider le conducteur en lui fournissant en continu des informations subsymboliques dans la tâche de guidage du véhicule. Ce second axe de recherche se centre sur le contrôle cognitif de l'activité dans le cadre de la coopération homme-machine lorsque l'intervention haptique est continue.

Ces deux dispositifs nous apparaissent comme un terrain de recherche idéal car ils concentrent à la fois des enjeux théoriques et pratiques. Du point de vue théorique ils correspondent tout à fait à une situation de coopération homme-machine dans laquelle l'activité doit être contrôlée à partir de données symboliques et subsymboliques. Du point de vue pratique, concevoir des dispositifs haptiques intervenant sur le volant nécessite de comprendre et d'anticiper l'articulation entre les effets de ces dispositifs et l'activité des conducteurs.

Cette thèse étudiera donc les relations entre conducteurs et machines autonomes lorsque les deux agissent en même temps sur le volant, dans une situation potentiellement risquée nécessitant une réponse rapide et avec le minimum d'interférences négatives possibles. Ces dispositifs étant des prototypes, et la situation étudiée étant dangereuse, les recherches qui ont été réalisées dans le cadre de cette thèse l'ont été sur simulateur de conduite. Nous avons ainsi pu étudier l'action de ces dispositifs dans des conditions variées et étudier de quelle façon des conducteurs coopèrent avec ces derniers.

1.3 Questions de recherche et plan du mémoire

Comment s'opère le contrôle de l'activité de guidage du véhicule lorsqu'un automate agit directement sur le dispositif de commande et produit un effet au niveau subsymbolique sur la modalité haptique ? Cette question résume donc le travail de cette thèse et est le fil conducteur qui sera suivi tout au long de ce document.

A la suite de ce premier chapitre introductif, suivront trois chapitres théoriques, résumant l'avancée des connaissances qui nous seront nécessaires pour étudier cette question. Ayant fait le choix de présenter nos recherches sous la forme d'une thèse sur article nous présenterons dans les chapitres théoriques les connaissances nécessaires à la compréhension du contexte générale de la thèse ainsi qu'au suivi du fil conducteur de notre travail. Toutefois, afin d'éviter une trop grande redondance, certains points théoriques précis ne seront abordés que dans les chapitres expérimentaux qui sont présentés sous forme d'articles scientifiques.

Ainsi, **le chapitre 2** présente la question du contrôle cognitif de l'activité en situation dynamique en accordant une place non négligeable aux recherches menées sur les activités perceptivo-motrices. **Le chapitre 3** développe le cadre, les enjeux et la problématique de la coopération homme-machine. Enfin, **le chapitre 4** conclut le cadre théorique de la présente thèse en discutant les choix méthodologique de nos recherches.

Ensuite, la question centrale de cette thèse est détaillée en quatre chapitres expérimentaux, regroupés deux à deux. Cette question doit être détaillée car nous utilisons deux objets technologiques très proches, mais néanmoins fondamentalement distinct dans l'interaction qu'ils ont avec le conducteur et donc dans les effets qu'ils vont avoir sur le conducteur et le contrôle cognitif de son activité.

Ces chapitres sont des articles publiés, soumis, ou en passe de l'être. Trois de ces articles sont présentés en anglais, puisqu'ils sont reproduits en l'état, les seules modifications étant « cosmétiques », afin de présenter une certaine homogénéité tout au long de la thèse. Au début de chaque chapitre expérimental, nous présenterons en français le rationnel de l'étude et résumerons les principaux résultats et conclusions partielles.

Les deux premiers (chapitres 5 et 6) s'intéresseront à *l'intervention ponctuelle* d'une assistance au niveau haptique. Nous nous intéresserons alors à la capacité des conducteurs à conserver la totale maîtrise du véhicule quels que soient les effets du dispositif. Cette problématique est en effet centrale dès lors que le dispositif intervient par la modalité haptique et est conçu pour amorcer le geste de correction. S'intéresser à cette problématique revient à répondre à la question suivante : le conducteur garde-t-il le contrôle lors de l'intervention du dispositif ? Cette question sera alors déclinée en deux chapitres. **Le chapitre 5** répondra à la question de savoir si le conducteur peut inhiber l'effet ponctuel d'un tel dispositif, quelle que soit la force et la direction de l'amorçage. **Le chapitre 6** répondra à la question de la capacité à moduler le geste de correction en fonction de la représentation du risque associé au contexte.

Dans les deux chapitres expérimentaux suivant (chapitres 7 et 8) nous nous intéresserons au cas de *l'intervention en continu*. La question du contrôle de l'activité ne pourra pas se poser dans les mêmes termes. Nous allons alors développer notre analyse de la relation homme-machine en étudiant la façon dont le conducteur intègre cette intervention en continu dans ses boucles de contrôle sensori-moteur. Une première question ayant trait au réglage du dispositif (en termes de degré de partage du contrôle) ainsi qu'au rôle que joue la capacité à anticiper la trajectoire de la part du conducteur sera traitée dans **le chapitre 7**. Enfin, la question des mécanismes adaptatifs mis en jeu lors d'une conduite prolongée avec un tel dispositif sera développée dans **le chapitre 8**.

Les deux derniers chapitres tiendront lieu d'épilogue à cette thèse. Dans **le chapitre 9**, correspondant à la discussion générale, les principaux résultats obtenus seront exposés synthétiquement, puis leurs implications seront discutées. **Le chapitre 10** permettra ensuite de conclure sur une réflexion générale à propos des apports de ce travail ainsi que sur les grandes questions transversales ayant parcouru nos travaux de recherche. Pour terminer, de nouvelles hypothèses de travail seront proposées.

1.4 Références

- Amalberti, R. (1996). *La Conduite des systèmes à risque*, Coll. Le Travail Humain, Paris, Presses Universitaires de France.
- Hoc, J.M. (2004). La gestion de situation dynamique. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie* (pp. 517-530). Paris: Presses Universitaires de France.
- Hoc, J.M., Young, M.S., & Blosseville, J.M. (2009). Cooperation between drivers and automation: implications for safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10, 135-160.
- Hoc, J.M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive Control Dynamics for Reaching a Satisficing Performance in Complex Dynamic Situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1, 22-55.
- Jamet, E., Gavota, M., & Quaireau, C. (2008). Attention guiding in multimedia learning. *Learning and instruction*, 18, 135-145.

- Morel, G., Amalberti, R., & Chauvin, C. (2008). Articulating the differences between Safety and Resilience: the decision-making process of professional sea fishing skippers, *Human Factors*, 50, 1-16.
- Navarro, J., Mars, F., & Hoc, J.M. (2007). Lateral control assistance for car drivers: a comparison of motor priming and warning systems. *Human Factors*, 49, 950-960.
- Parasuraman, R., Sheridan, T., & Wickens, C. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 30, 286-297.
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction*. Amsterdam: Elsevier.
- Tricot, A., & Amadieu, F. (2011). Navigation dans les hypertextes. In J. Dinet & J.M.C. Bastien (Eds.), *L'ergonomie au service de la vie quotidienne* (pp. 167-192). Paris : Hermès.
- Van Daele, A., & Carpinelli, F. (2001). La planification dans la gestion des environnements dynamiques : quelques apports récents de la psychologie ergonomique. *Psychologie Française*, 46, 143-152.

Chapitre 2 - La régulation de l'activité en situation dynamique

« La réalité c'est ce qui refuse de disparaître quand on cesse d'y croire »

Siva, 1981, **Philip K. Dick**

SOMMAIRE

- 2.1 Les modèles du contrôle cognitif de l'activité en situation dynamique
 - 2.2 La spécificité du contrôle sensori-moteur dans le contrôle cognitif
 - 2.3 Le contexte de la conduite automobile
 - 2.4 Références
-

2.1 Les modèles du contrôle cognitif de l'activité en situation dynamique

Toute activité nécessite pour la personne qui l'entreprend des processus de régulation dans le sens du contrôle et de la correction des productions. Le contrôle s'exerce sur un continuum allant des activités de haut niveau aux activités plus automatisées. Le contrôle des activités de haut niveau est réalisé de façon sérielle sur des symboles. Nous parlerons alors de contrôle symbolique. Le contrôle des activités automatisées peut être réalisé de façon parallèle sur tout un ensemble de signaux. Nous parlerons alors de contrôle subsymbolique.

Pour les activités de haut niveau, dans les neurosciences, il est coutume de parler des fonctions exécutives pour parler du contrôle symbolique de l'activité et les auteurs situent ces fonctions dans les lobes frontaux (Luria, 1966). Les accidents produisant des lésions frontales ou les pathologies conduisant à une détérioration des fonctions exécutives (Alzheimer) illustrent cette problématique du manque de contrôle symbolique et du manque d'adaptation.

Pour les activités plus automatisées le contrôle s'exerce à la fois dans les boucles de régulation de ces automatismes et à la fois via la supervision par un contrôle de haut niveau de ces automatismes. C'est le rôle de la supervision symbolique. Ces automatismes peuvent être de type sensori-moteur ou bien des raccourcis de la cognition, issus du développement d'habiletés.

La psychologie et plus récemment la psychologie cognitive ont produit différents modèles afin d'essayer de rendre compte des processus mis en jeu lors du contrôle cognitif de l'activité (Richard, 2004). L'activité de contrôle est essentielle dans les possibilités d'adaptation qu'un individu peut avoir dans un environnement qui varie en permanence et n'est pas prédictible. Le contrôle a donc une fonction adaptative et un déficit dans le contrôle de l'activité rend difficile cette adaptation.

L'un des principaux débats autour de la notion de contrôle de l'activité est situé au niveau de l'architecture de la cognition. Classiquement en psychologie, c'est une conception plutôt modulaire qui est utilisée (Fodor, 1983). Toutefois, d'autres paradigmes davantage anatomo-centrés décrivent des organisations décentrées et émergentes. C'est par exemple le cas du paradigme de l'énaction développé par Varela (1997) qui, à partir de travaux sur des réseaux de neurones, décrit un fonctionnement de type émergent. Dans le cadre de cette thèse nous ne nous intéresserons pas aux débats récurrents entre ces différentes conceptions ayant trait à l'organisation de la cognition. Nous ne nous intéresserons pas davantage à la question des relations anatomo-fonctionnelles dévolue au contrôle. Ces questions importantes nécessitent des recherches approfondies qui ne sont pas notre objet d'étude. Notre intérêt pour des situations complexes, car dynamiques, rend nécessaire l'utilisation de modèles modulaires et fonctionnels qui proposent une description heuristique de la cognition. Ces modèles nous apparaissent en effet suffisant et exhaustif pour répondre aux questions de recherche que nous nous posons. Nous nous situons donc dans une approche cognitiviste et considérerons la cognition comme l'utilisation de modèle de son environnement en vue de l'adaptation.

Afin de décrire le processus du contrôle de l'activité nous allons commencer par rappeler que la cognition se base à la fois sur du traitement de symbole (processus de hauts niveaux), mais également sur le traitement de signaux (processus de bas niveaux). Nous préciserons alors les limitations en termes de traitement symbolique de la cognition humaine et donc la nécessité de fonctionner en partie sur des automatismes (signaux). Nous décrirons ensuite brièvement le Modèle ACT-R de Anderson (2004) avant d'introduire plus précisément le modèle de Hoc et Amalberti (2007) que nous utiliserons pour interpréter nos résultats expérimentaux.

2.1.1 Les différents niveaux de contrôle cognitif

Le fait que les ressources symboliques de l'opérateur soient limitées est reconnu depuis longtemps. Les premières théories en psychologie cognitive qui ont essayé de modéliser ces limitations se sont intéressées aux capacités limitées de prise et de traitement de l'information (Broadbent, 1957). Ces limitations ont ensuite généralement été étudiées en des termes de type de processus mis en jeu dans le contrôle de l'activité (Schneider et Shiffrin, 1977) ou de charge mentale (Sweller, 1988). Toutefois, il ressort de ces différentes études que les opérateurs ne sont pas passifs devant ces limitations et fonctionnent par raccourci leur permettant une économie et donc un dégagement de ressources. Des stratégies d'alternance entre différents niveaux de processus sont donc mises en place afin d'économiser les ressources (Amalberti, 1996).

La célèbre classification SRK (*Skill-Rule-Knowledge*) des niveaux de contrôle de Rasmussen (1976) résume les différents processus allant d'un contrôle symbolique (fonctions exécutives) très coûteux en ressource à un contrôle très automatisé, et très limité en coût cognitif (Figure 1).

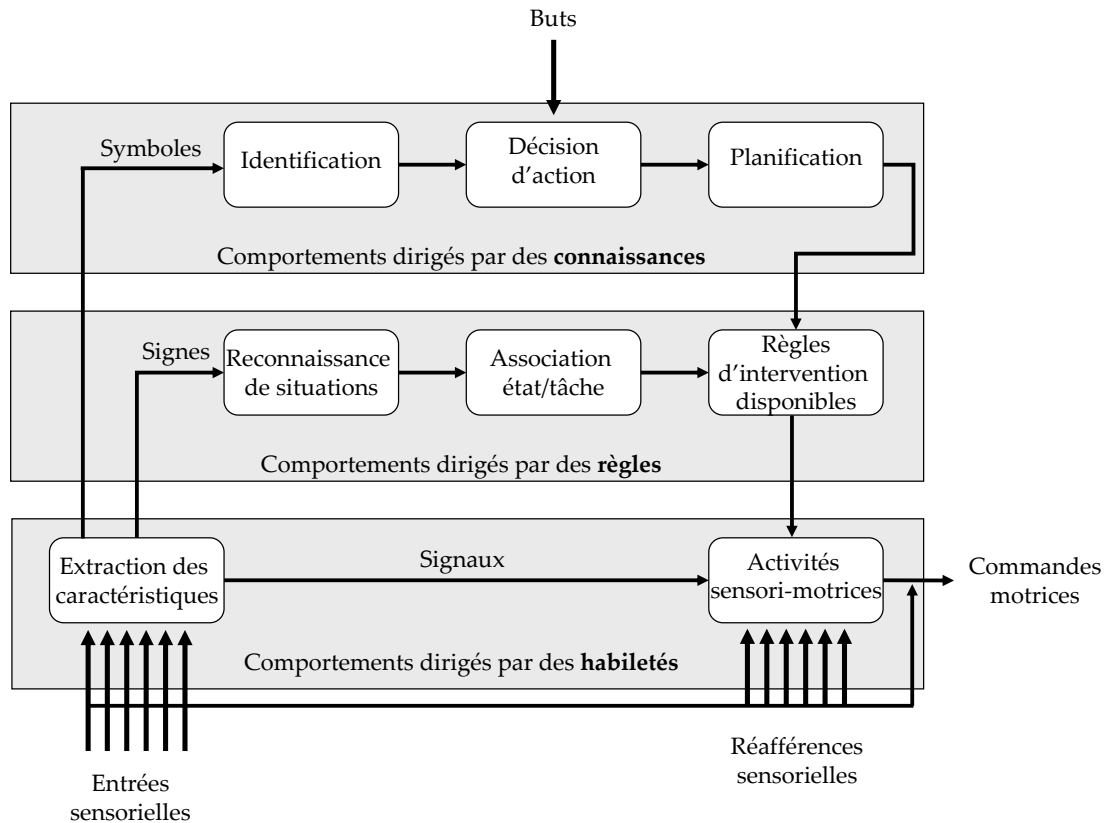


Figure. 1. Les différents niveaux de contrôle de l'activité présentés par Rasmussen (1983).

Rasmussen distingue les activités basées sur l'ensemble des connaissances que possède le sujet (*Knowledge-based behaviour*) et qui permettent un contrôle pas à pas, mais qui sont lentes et fortes consommatrices en ressources. Cette activité correspond au plus long parcours sur la figure 1 et commence par la perception des caractéristiques de l'environnement qui sont alors traduites en symboles.

Les activités basées sur les règles (*Rule-based behaviour*) impliquent un contrôle attentionnel symbolique à chaque étape importante du raisonnement. Ce type d'activité est fréquent dans la gestion des situations délicates ou incidentielles réclamant un niveau de compréhension plus élevé que les activités routinières. Dans la figure 1 cela correspond au parcours intermédiaire qui commence par la perception de signes dans l'environnement.

Enfin, les activités basées sur des habiletés (*Skill-based behavior*), permettent l'exécution de travaux routiniers avec un très faible contrôle attentionnel symbolique. Dès qu'un certain degré d'expertise est atteint l'activité est guidée par ces automatismes. Ce parcours est le plus court et la perception de signaux est suffisante pour guider l'activité.

La figure 1 présente donc les différents parcours ayant trait au contrôle de l'activité en fonction du degré d'abstraction des données. Les signaux provoquent un contrôle basé sur les automatismes alors que les symboles sollicitent un contrôle basé sur les connaissances déclaratives. Plus le parcours est long et plus le coût cognitif est élevé. Enfin, le traitement symbolique implique un traitement sériel de l'information, qui est long et coûteux en comparaison du traitement parallèle réalisé au niveau des automatismes.

Dans ce modèle, le développement de l'expertise conduit ainsi à fonctionner au maximum sur des activités basées sur les habiletés, afin d'économiser des ressources symboliques. Il en résulte des capacités de réserve pour l'expert qui peut allouer ses ressources à d'autres

activités intellectuelles : prise d'information, anticipation, planification. Ainsi on constate que la charge de travail de l'opérateur expert est réduite par rapport à celle du novice (Bainbridge, 1989).

2.1.2 La supervision des automatismes

Un fonctionnement basé les automatismes ne signifie nullement l'absence de contrôle symbolique de plus haut niveau. Le contrôle correspond donc à la fois à l'ordonnancement des activités dans le bon ordre mais également à la supervision des automatismes. Par exemple, les travaux d'Anderson sur l'architecture de la cognition mettent notamment l'accent sur le rôle de la supervision lors de l'exécution des routines. Dans son célèbre modèle ACT-R, revisité en de multiples versions, Anderson (2004) décrit un fonctionnement modulaire de la cognition. Dans ce modèle, un module central (le module procédural) est chargé d'évaluer le contenu des buffers de chacun des autres modules (visuel, auditif, déclaratif, etc.) et de sélectionner le contenu des buffers qui répondent au but souhaité puis de les envoyer vers le module moteur qui sera chargé de leur réalisation comportementale. Anderson parle alors de production pour décrire le contenu sélectionné, puis exécuté par le module procédural. Cette description met ainsi l'accent sur un module central chargé de superviser le contrôle de l'activité, que cette activité soit basée sur des connaissances (module déclaratif) ou sur des automatismes (autres modules dépendants du type d'automatisme).

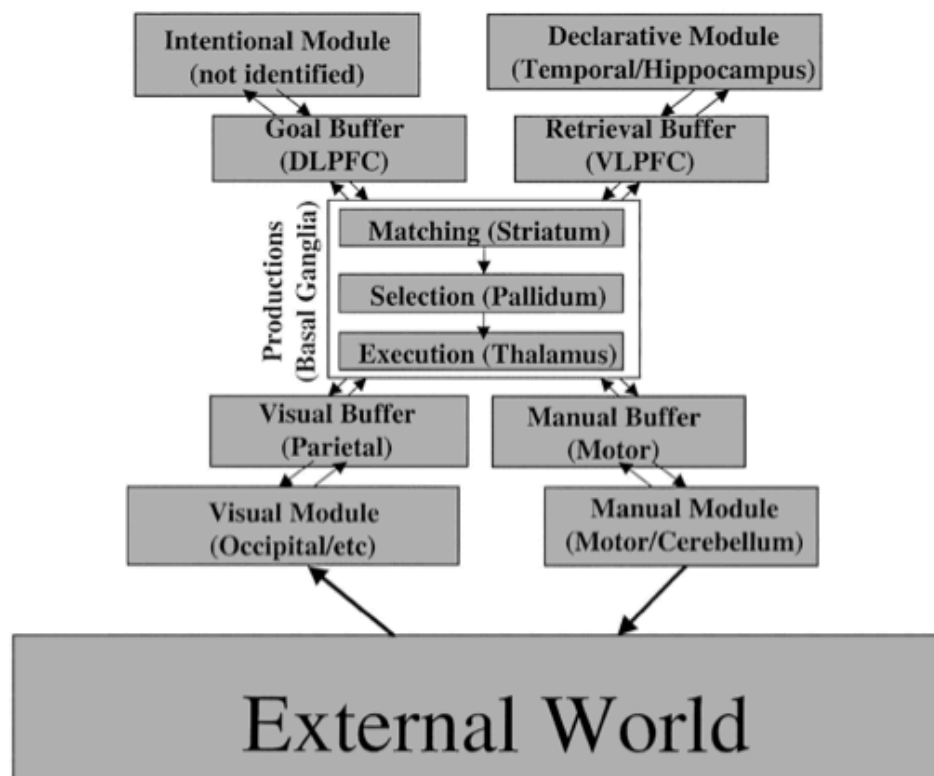


Figure. 2. Modèle ACT-R d'Anderson (2004).

Dans ACT-R, les habiletés complexes sont ainsi le résultat de l'enchaînement de productions élémentaires. Ces enchaînements permettent au modèle de mettre en œuvre des savoir-faire comme par exemple, conduire une voiture, taper au clavier, faire une recette de cuisine, etc. (Pompanon, 2009).

2.1.3 Le compromis cognitif

Dans la prolongation des travaux que nous venons de présenter, Hoc et Amalberti (2007) ont proposé une théorie sur un ajustement dynamique du contrôle cognitif en fonction des besoins de la situation. Ces auteurs décrivent le contrôle cognitif comme l'autorité qui rend possible la mise en jeu, dans un ordre correct et avec l'intensité appropriée, des représentations cognitives et des opérations requises pour l'adaptation, en accord avec les exigences externes et internes. Cela inclut le contrôle direct ainsi que la supervision d'un niveau de contrôle super-ordonné sur un autre niveau sous-ordonné.

La figure 3 présente ce modèle qui s'articule autour de deux dimensions permettant de caractériser le contrôle. Un premier axe, l'axe symbolique / subsymbolique, s'inspire du modèle SRK de Rasmussen et le résume en constituant un axe correspondant au niveau d'abstraction des données. Un second axe, original par rapport au modèle de Rasmussen, décrit l'origine des données nécessaires au contrôle (interne / externe). Afin de présenter de modèle nous allons commencer par présenter les modes de contrôle cognitif pour ensuite décrire l'ajustement dynamique de ce contrôle cognitif, nommé réglage du compromis cognitif.

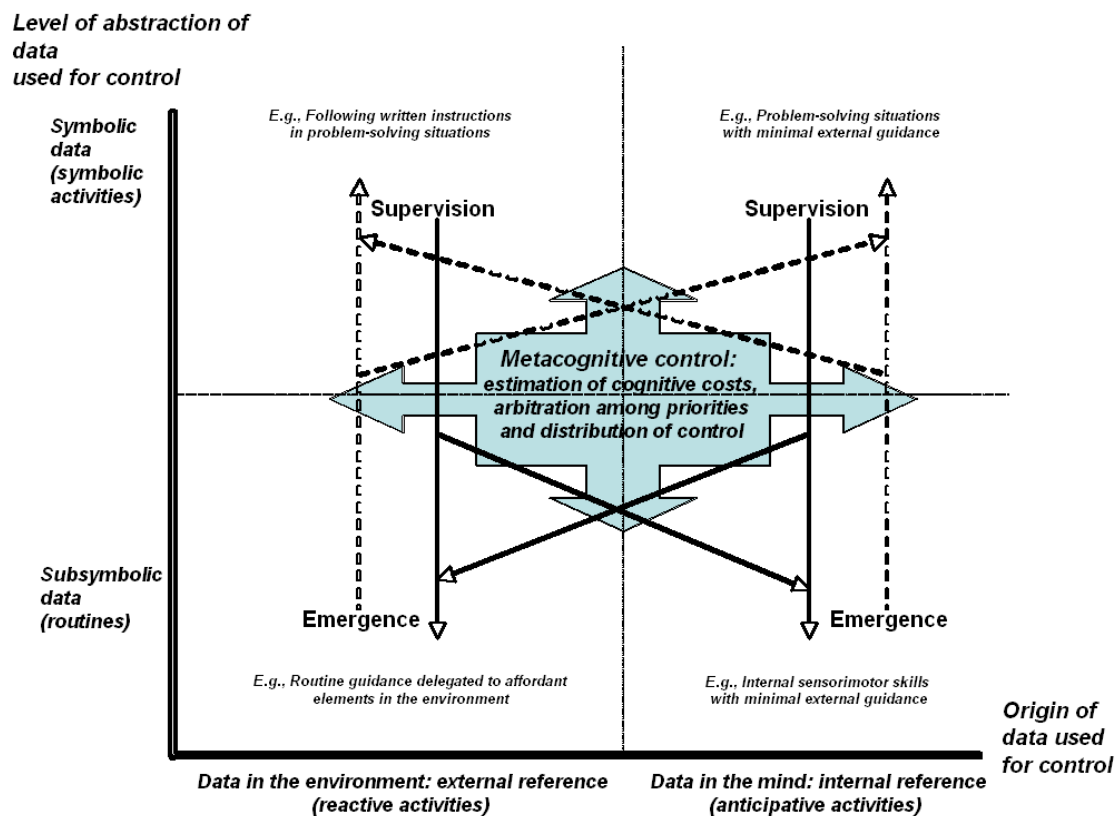


Figure. 3. Modèle du contrôle cognitif de Hoc et Amalberti (2007).

2.1.3.1 Les modes de contrôle

Hoc et Amalberti (2007) utilisent plusieurs caractéristiques pour décrire la façon dont le contrôle cognitif s'exerce ainsi que le type de données utilisé dans ce contrôle.

La maîtrise de la situation, qui garantit qu'une performance acceptable sera atteinte avec une quantité acceptable de ressources, est l'élément principal utilisé par l'opérateur pour ajuster son contrôle cognitif. Deux dimensions sont proposées pour caractériser les modes du

contrôle cognitif. Le niveau d'abstraction des données (symbolique / subsymbolique) et l'origine de ces données (interne / externe).

Le niveau d'abstraction des données se fonde sur le modèle SRK de Rasmussen (1986). Ce modèle est le support d'une théorie sur le développement de l'expertise conçu comme une activité de routinisation. Le traitement symbolique, plus coûteux en activités interprétatives, concerne la manipulation des concepts et des signes et est effectué de façon séquentielle. C'est-à-dire lorsque la tâche requiert un investissement en charge mentale important. C'est par exemple le cas lors des premières étapes d'un apprentissage. Le traitement subsymbolique, moins coûteux, concerne les signaux et est effectué en parallèle. Il concerne les processus automatiques qui correspondent aux routines acquises avec le développement de l'expertise. Par exemple lorsqu'un niveau suffisant d'expertise est atteint, la conduite se base essentiellement sur ce type de traitement, ce qui permet alors aux individus de dégager des capacités de traitement symbolique pour d'autres activités (conversation par exemple).

L'origine des données (interne / externe) permet d'intégrer l'origine des déterminants, mais également la dynamique de l'apprentissage. Notre contexte applicatif étant celui de la conduite, nous prendrons donc dans la suite de cet exposé des exemples tirés de cette situation particulière. Toutefois, les modèles que nous utilisons sont adaptés pour tout un ensemble de situations dynamiques. Avec le développement de l'expertise certains déterminants externes sont requis de façon moindre pour le contrôle. C'est par exemple le cas de l'utilisation du levier de vitesse, qui est regardé fréquemment lors de l'apprentissage de la conduite, puis très rarement, voir jamais, lorsqu'un certain niveau d'expertise est atteint. Au contraire, d'autres déterminants externes peuvent être utilisés davantage au cours du développement de l'expertise. Il en va ainsi des affordances construites (Norman, 1988). Par exemple, avec l'expérience, l'allumage des feux stop du véhicule devançant le conducteur peut induire un relâchement automatique de la pédale d'accélérateur du conducteur. Ajoutons à cela que l'axe interne / externe est confondu, dans la théorie de Hoc et Amalberti, à l'axe anticipation / réaction, qui renvoie à la dimension temporelle du contrôle et qui est un élément déterminant dans la gestion des environnements dynamiques.

2.1.3.2 Le réglage du compromis cognitif

En fonction des exigences de la situation, l'opérateur est amené à investir plus ou moins de ressources dans son activité. C'est ce que Hoc et Amalberti (2007) définissent comme le réglage du compromis cognitif. Ce compromis cognitif correspond donc à un effort de mobilisation cognitif adapté à l'objectif souhaité c'est-à-dire à une performance acceptable. Deux processus complémentaires sont en jeu dans le réglage du contrôle cognitif : la supervision et l'émergence.

La supervision est le moyen de calibrer les opérations de routine pour s'acquitter de buts super-ordonnés. Elle joue un rôle important dans la gestion des erreurs, étant donné qu'un mode de contrôle entièrement basé sur les routines peut provoquer une large déviation par rapport aux intentions de base. C'est l'idée que, bien que l'activité de conduite d'un expert repose en grande partie sur des automatismes, la supervision de ces derniers permet leur particularisation aux buts souhaités dans une situation particulière. C'est ce mécanisme que nous avons précédemment décrit dans le modèle de Anderson (2004) et qui correspond à l'évaluation par le module procédural du contenu des buffers de chacun des autres modules.

L'émergence permet quant à elle aux routines de retourner des informations aux activités symboliques. De cette façon, le contrôle symbolique peut devenir actif en cas de nécessité. Il peut alors envoyer de nouveaux objectifs aux routines ou bien les remplacer quand la situation le requiert. Ce processus décrit le passage d'un contrôle basé sur les automatismes à

un contrôle plus symbolique, lorsque les routines deviennent dépassées ou inopérantes du fait du contexte de la tâche. Ainsi lorsque la tâche le nécessite le conducteur peut basculer rapidement sur un niveau de contrôle symbolique plus important afin de contrôler avec davantage de ressources sa conduite (interruption momentanée d'une conversation en cas de perturbation soudaine de l'activité de conduite par exemple).

Les auteurs soulignent enfin l'importance du rôle de la métacognition. Cette dernière est vue dans cette théorie comme un moyen de distribuer le contrôle cognitif au sein de ses différents modes afin d'assurer la maîtrise de la situation. Le contrôle métacognitif arbitre donc entre les différents modes du contrôle cognitif. Il gère les coûts de l'activité cognitive en fonction du niveau de performance souhaité, ou acceptable.

2.2 La spécificité du contrôle sensori-moteur dans le contrôle cognitif

Parler de contrôle de l'activité fait immédiatement penser aux fonctions cognitives de haut niveau, toutefois il ne faudrait pas oublier que le contrôle s'exerce aussi au niveau subsymbolique et que les processus sensori-moteurs sont intégrés dans ce niveau subsymbolique. A l'origine, la psychologie ergonomique s'était intéressée à la sensori-motricité. Nous pouvons citer par exemple les travaux précurseurs de Fitts (1954) sur les mouvements de pointage guidés par la vision. Ces recherches avaient mis l'accent sur les liens entre vitesse, précision et amplitude d'un mouvement. Des recommandations ergonomiques avaient alors été formulées et sont d'ailleurs toujours utilisées dans des activités comme la navigation sur les sites web, qui nécessitent l'atteinte d'une cible (un lien ou un bouton) par un guidage visuel.

Toutefois, dans les années 70 l'essor de l'informatique a conduit les travaux sur les interactions homme-machine à s'intéresser davantage aux activités cognitives dites symboliques (Mestre, 2004). Ce sont par exemple des problématiques liées à la navigation ou à la prise de décision lors de l'interaction avec les machines qui ont été développées dans les recherches en ergonomie cognitive. Mestre souligne toutefois que l'intérêt pour les travaux menés sur la sensori-motricité se renouvelle avec l'essor des technologies de réalités virtuelles qui nécessitent un réglage fin entre perception et mouvement.

En reprenant les niveaux de contrôle introduit par Rasmussen (1983) nous voyons que le niveau sensori-moteur est incontournable dès lors qu'il y a action sur l'environnement. Il va correspondre au niveau d'exécution moteur résultant de n'importe quel type de contrôle. Le niveau sensori-moteur est donc l'aboutissement de chacun des types de contrôle, mais il en est également l'initiateur. Ce sont les perceptions issues de ce niveau qui alimenteront ensuite les processus de contrôle symbolique. D'une certaine façon dans le modèle de Rasmussen le contrôle basé sur les habiletés correspond au traitement des signaux restant uniquement à ce niveau sensori-moteur. Dans la conduite automobile, le réglage de la vitesse pour réguler les inter-distances, le couplage entre le regard et le contrôle du volant dans la prise de virage (Mars, 2008) ou l'utilisation des retours de force sur le volant renvoyant des informations sur l'adhérence sont des exemples d'utilisation de signaux durant l'activité de conduite.

Le modèle de Hoc et Amalberti (2007) élargi la notion de contrôle subsymbolique en intégrant d'autres automatismes que ceux uniquement basé sur les informations sensori-motrices. Les raccourcis de pensée comme la calcul mental relève de ce niveau subsymbolique. De plus, le modèle de ces auteurs souligne le rôle du processus de supervision qui est chargé de détecter des écarts entre les signaux et les productions et permet le basculement vers un mode de contrôle plus symbolique. Enfin, quel que soit le mode de contrôle, l'opérateur doit pouvoir anticiper les conséquences de ses actions. Si les recherches menées en ergonomie cognitive ont produit des modèles plutôt détaillés sur les processus

symboliques mis en œuvre dans le contrôle de l'activité, tels que ceux d'élaboration de but ou de planification (Hoc, 1987) l'ergonomie cognitive est peu détaillée quant aux processus mis en jeu dans le contrôle sensori-moteur de l'activité ainsi que de son articulation avec les niveaux symboliques. Par exemple, tout comme pour les activités symboliques, il est nécessaire d'anticiper le résultat du contrôle du mouvement. Le contrôle de l'activité nécessite également, de fait, une anticipation des conséquences de l'action.

Aussi, afin de détailler la façon dont l'activité est régulée au niveau sensori-moteur, nous développerons la théorie des modèles internes du mouvement. Puis, nous discuterons de la question de la production volontaire d'un mouvement. En effet, même si les terminologies employées divergent, les recherches menées en science du mouvement sur les modèles internes décrivent tout à fait ce qui pourrait s'apparenter à des représentations subsymboliques nécessaire à l'anticipation des résultats de l'action.

2.2.1 Le rôle des modèles internes dans le contrôle sensori-moteur

Les productions sensori-motrices sont basées sur des modèles internes des mouvements permettant d'anticiper le résultat de l'action avant même son exécution. Le concept de modèle interne a été introduit dans les théories du contrôle moteur par Wolpert, Ghahramani et Jordan (1995) afin de pouvoir expliquer comment le système moteur pouvait prendre en compte à la fois les propriétés physiques de ses propres effecteurs, ainsi que les propriétés de son environnement. Ces modèles internes sont également utilisés pour coordonner les programmes moteurs sollicités par différentes modalités. Vercher, Sarès, Blouin, Bourdin et Gauthier (2003) présentent, par exemple, la façon dont le système visuel et le système manuel partagent un modèle interne des propriétés dynamiques du bras pour réaliser une tâche de *tracking* visuel (suivi de cible).

Il existe différents types de modèles internes (Deborne, 2009). Une première classe de modèle interne concerne la description de l'appareil sensori-moteur. Cette classe permet de fournir au système nerveux central une prédiction du mouvement désiré. Une seconde classe de modèle décrit les connaissances acquises relatives à la dynamique de l'environnement et au fonctionnement des objets manipulés. Nous disposons, par exemple d'un modèle intégrant la trajectoire d'une balle que nous lancerions, en fonction de sa masse, de la direction et de la force que nous délivrerions pour la projeter. Les modèles internes intègrent donc à la fois les boucles sensori-motrices de l'individu, mais également sa connaissance qu'il a de l'environnement.

Les travaux de Held (1965) représentent une étape importante dans la mise en évidence expérimentale de l'adaptation sensorimotrice par apprentissage et de l'existence de représentations sensori-motrices. Held proposa à ses sujets une tâche de pointage avec port, ou non, d'une paire de lunettes prismatique. Ces lunettes produisent une déformation angulaire et constante de la vision et donc ce l'espace et de la cible. Dans la condition avec port de lunettes prismatique, la cible à pointer du doigt se trouve visuellement décalée de 20 degrés sur la gauche. Les sujets réalisaient tout d'abord la tâche dans des conditions dites nominales, sans altération visuelle puis ils devaient revêtir des lunettes prismatiques. Lors de leur première tentative avec ces dernières, les sujets manquaient la cible avec un écart identique à celui induit par les lunettes. Après plusieurs dizaines d'essais, les sujets étaient capables d'accomplir la tâche et de retrouver le même niveau de performance qu'ils avaient obtenu lors des essais en conditions nominales. Une fois les lunettes retirées, les sujets manquaient la cible de nouveau avec cette fois-ci un écart de valeur identique mais dans le sens contraire à celui observé lors du port des lunettes. Ce phénomène appelé *after-effect* est caractéristique du processus de désadaptation à la suite d'un apprentissage. Mai surtout, ce phénomène d'*after-effect* est donc considéré comme caractéristique de la construction ou

modification d'un modèle interne et permet, entre autre, d'identifier un mécanisme d'adaptation (Deborne, 2009).

De ce fait, les processus sensori-moteurs sont tout aussi cognitifs que les processus symboliques, puisque basés sur des représentations du monde pour l'adaptation. Les commandes motrices sont donc spécifiques à un contexte et l'adaptation à une nouvelle situation nécessite la mise à jour de ces représentations internes.

Ainsi, quel que soit le mouvement réalisé, les opérateurs s'appuient sur des modèles internes permettant d'anticiper le résultat de leur action. Du point de vue pratique, cette connaissance de la façon dont s'exerce le contrôle sensori-moteur peut alors être utilisé pour guider l'apprentissage. Par exemple, Reinkensmeyer et Patton (2009) ont montré la façon dont des robots peuvent aider, par l'exercice de force mécaniques, à l'élaboration d'un modèle interne du mouvement à produire. Dans cette revue de question les auteurs décrivent comment des forces mécaniques appliquées dans la réalisation de courbes avec un stylo, de la marche ou de la réalisation d'un *putting* au golf (faire rouler la balle jusqu'au trou) peuvent aider à la mise à jour d'un modèle interne très précis des ces mouvements. Des phénomènes d'*after-effects* sont bien évidemment produits lorsque ces forces sont retirées, mais l'apprentissage est tout de même réalisé. Les *after-effects* sont, en effet, rapidement pris en compte pour mettre à jour les modèles internes servant à réaliser efficacement les mouvements sans force mécanique présente.

Les auteurs concluent alors que ces robots pourraient être utilisé pour enseigner en toute sécurité la réalisation de mouvements qui ne sont réalisés en situation nominale qu'avec un certain niveau de risque.

2.2.2 Le contrôle volontaire du mouvement

Lorsque l'on s'intéresse au contrôle de l'activité au niveau des mécanismes sensori-moteurs il convient de discuter de la question de la volonté. En effet, à ce niveau de contrôle, une importante difficulté est celle de distinguer ce qui correspond au contrôle volontaire de ce qui correspond davantage au réflexe. Autrement dit il convient d'identifier au sein du contrôle sensori-moteur ce qui est de l'ordre du contrôle volontaire de ce qui est étroitement lié aux boucles réflexes.

Au sein des neurosciences, Prochazka, Clarac, Loeb, Rothwell et Wolpaw (2000) ont dressé une intéressante revue de question sur cet ancien débat qui cherche à distinguer les mouvements réflexes des mouvements volontaires, et qui agite toujours autant la science moderne. Pour ces auteurs aucun consensus n'a put être trouvé sur une distinction claire entre ces deux catégories. Les cinq auteurs ont approché le sujet de différentes façons, l'ont analysé différemment et ont donc atteint des conclusions différentes. Deux approches complémentaires peuvent néanmoins en être dégagées : la position de Prochaska, Loeb et Rothwell et la position de Clarac et Wolpaw.

Prochaska, Loeb et Rothwell se sont centrés sur le contrôle la distinction cruciale entre un comportement réflexe et un comportement volontaire. Pour Prochaska, les comportements volontaires sont ceux qui sont considérés par l'individu qui les réalise comme étant initié uniquement par lui. Pour un observateur extérieur, ce sont ceux qui peuvent être supprimés à volonté, c'est-à-dire ceux qui peuvent être volontairement inhibés. Les comportements réflexes sont par contre ceux qui apparaissent comme irrépressibles et difficiles à supprimer. Pour Loeb, les comportements volontaires sont ceux qui ont lieu sous contrôle conscient, alors que les réflexes sont ceux qui ne peuvent être modifiés à volonté, c'est-à-dire consciemment, durant leur exécution. Rothwell pense que cela n'a pas d'importance qu'un

comportement puisse être réalisé consciemment. S'il peut être interrompu, il est alors sous le contrôle de la volonté. La volonté devient alors une mesure de la capacité à les influencer.

Clarac et Wolpaw, par contre, ont expliqué que les comportements sont la résultante d'interactions au niveau sensori-moteur, et voient la complexité de l'interaction comme l'élément central permettant la distinction entre le réflexe et le volontaire. Pour Clarac, un réflexe est une simple réaction à des stimuli et peut être un moyen pour explorer le fonctionnement du système nerveux central. Pour Wolpaw, un réflexe est un comportement provoqué par un enchaînement connu de stimuli alors qu'un comportement volontaire est produit par un enchaînement complexe et encore indéfini de stimuli. Autrement dit, c'est le niveau de compréhension scientifique des phénomènes qui permet au chercheur de les classer entre les comportements réflexes et les comportements volontaires. La résultante de cette position est qu'avec les avancées de la recherche, la classe des comportements réflexes ne fera que croître, alors qu'à l'inverse celle des comportements volontaires déclinera.

La position de Prochaska, Loeb et Rothwell a l'avantage d'être en lien avec les définitions courantes de réflexe et de volonté, mais intègre les notions complexes de contrôle et de conscience. La position de Clarac et de Wolpaw a par contre l'avantage d'une bonne clarté physiologique et anatomique mais évite soigneusement les thématiques connexes à celle de la conscience.

La position de Clarac et Wolpaw révèle une position épistémologique faisant passer au premier plan l'approche descriptive plutôt que celle explicative proposée, par exemple, par la psychologie cognitive. Nous choisirons donc la position de Prochaska, Loeb et Rothwell pour distinguer un comportement réflexe d'un comportement volontaire. Cette position nous apparaît en effet plus pertinente pour étudier les effets que les assistances à la conduite, agissant au niveau subsymbolique, peuvent avoir sur le conducteur. Ce sera ainsi la possibilité de pouvoir supprimer à volonté le comportement (pour Prochaska et Rothwell) ou de pouvoir le modifier en cours d'exécution (pour Loeb) qui permettra de faire la distinction entre contrôle du mouvement et réflexe. Le réflexe sera donc considéré comme une boucle de régulation élémentaire très simple et ayant un centre de contrôle très proche. De plus, une fois le stimulus produisant le réflexe déclenché, le comportement devient irrépessible. Enfin, le circuit étant court, le comportement a aussi un temps de réaction très court.

2.3 Le contexte de la conduite automobile

Ce travail de thèse ne prend pas en compte l'intégralité de l'activité de conduite. Une description succincte de cette activité de conduite est néanmoins nécessaire pour avoir une vision cohérente et globale de l'activité dans laquelle nous intégrons ces recherches. Afin de construire cette représentation globale nous allons tout d'abord commencer par décrire l'environnement de conduite en précisant son caractère dynamique. Puis nous présenterons rapidement la description des véhicules modernes, systèmes mécatroniques complexes. Enfin, nous décrirons l'activité du conducteur en présentant les modalités sensorielles mises en jeu durant l'activité de conduite, puis nous introduirons quelques modèles globaux de la tâche de conduite pour finir sur l'activité de guidage du véhicule ainsi que les erreurs pouvant y survenir.

2.3.1 L'environnement dynamique de la conduite automobile

La conduite automobile s'inscrit dans le cadre des situations dynamiques, c'est-à-dire celles dans lesquelles l'agent humain ne peut exercer qu'un contrôle partiel sur son environnement. Un environnement dynamique est décrit par le fait qu'il évolue même lorsque l'opérateur ne fait rien (Hoc, 1996). L'environnement routier évolue même lorsque le véhicule est à l'arrêt,

par exemple lorsqu'un conducteur est arrêté à un feu tricolore. Un environnement dynamique possède à la fois des *contraintes* et des *constantes* de temps. Les contraintes de temps renvoient à la vitesse du processus et donc à la fréquence d'échantillonnage nécessaire pour détecter les modifications nécessitant une intervention de l'opérateur. Dans la conduite automobile cette contrainte temporelle est très importante et croît parallèlement à l'augmentation de la vitesse. Les constantes de temps renvoient au délai de réponse du processus, à son inertie. Par exemple la prise en compte de la distance de freinage relève de cette caractéristique. Le véhicule n'est pas stoppé immédiatement lorsque le conducteur le décide, il possède une dynamique qui nécessite une anticipation de la part de l'opérateur. Nous voyons donc que la question de la gestion du temps revêt une importance capitale dans ce type de situation. Le caractère dynamique de l'environnement implique de ce fait une certaine anticipation de la part des opérateurs (Cellier, 1996). Enfin, le contrôle basé sur les automatismes en conduite, moins coûteux en ressources et donc plus rapide à mettre en œuvre, découle de cette nécessité de gestion du temps, à la fois en termes de contrainte mais également de constante.

2.3.2 Le véhicule

Le véhicule a beaucoup évolué au cours des dernières décennies. C'est aujourd'hui un système mécatronique complexe qui rassemble des composantes mécaniques, électriques, électroniques et informatiques (Minoiu Enache, 2008). A titre illustratif le système de radio et de navigation de la Mercedes-benz classe S requiert plus de 20 millions de lignes de code et contient presque autant de puces électroniques qu'un airbus A380. Les logiciels embarqués continuent de croître en nombre et complexité. En 2008, la firme Frost & Sullivan a estimé que les voitures nécessiteraient prochainement entre 200 et 300 millions de lignes de codes. Nous assistons donc à un développement exponentiel des lignes de code nécessaire à la conception des véhicules modernes.

Bien évidemment, les dispositifs que nous utilisons durant cette thèse sont destinés à être installés dans des véhicules dits « haut de gamme », tout du moins dans un premier temps. Les dispositifs techniques autonomes sont en effet coûteux du fait de leur complexité ainsi que des capteurs qu'ils nécessitent pour fonctionner convenablement. Toutefois, il est possible que des déclinaisons de ces dispositifs finissent par se retrouver dans la totalité des voitures neuves si leur utilité est jugée suffisante par le législateur. Par exemple l'ESC devient obligatoire dès 2012 sur tout nouveau modèle de véhicule. L'ESC pour *Electronic Stability Control* est un équipement de sécurité actif en cas de dérapage latéral, diminuant les risques de perte de contrôle du véhicule. Si une situation anormale est détectée par les capteurs (survirage ou sous-virage), la trajectoire est corrigée par un freinage ciblé sur la roue concernée.

2.3.3 Le conducteur

Afin de décrire l'activité de conduite du point de vue de l'opérateur, c'est-à-dire du conducteur, nous allons commencer par aborder les principales modalités sensorielles utilisées dans cette activité. Nous décrirons ensuite la tâche de conduite en un modèle général de la conduite (Michon, 1985) ainsi qu'un modèle plus spécifique à l'activité de guidage du véhicule (Donges, 1978). Enfin nous décrirons les principales erreurs de conduite ayant trait au guidage du véhicule.

2.3.3.1 Les modalités sensorielles utilisées.

L'activité de conduite fait appel à de multiples modalités sensorielles. Nous allons aborder chacune de ces modalités afin de décrire la façon dont elles sont utilisées dans la tâche de

conduite. Ces modalités sont la vision, le sens vestibulaire, le sens haptique et enfin l'audition. Notons que si ces modalités sont présentées isolément dans un souci de clarté, il va sans dire que la perception de l'environnement résulte de l'intégration de ces différentes informations sensorielles entre elles. Par exemple, récemment Authié (2011) a mis en évidence les relations visuo-posturales dans le suivi de trajectoires en virage.

La modalité visuelle. Dans toute activité de déplacement, la vision est primordiale. En conduite automobile, la vision occupe donc nécessairement une place déterminante. Il est difficile d'estimer la part de la vision dans la tâche de conduite, mais cette modalité est bien évidemment la plus importante pour ce type de locomotion (Sivak, 1996). C'est par exemple principalement sur la base des informations visuelles qu'est menée l'activité de guidage du véhicule (Summala, Nieminen & Punto, 1996). Land et Lee (1994) ont notamment montré l'importance que pouvait avoir le point tangent dans la prise de virage. Le point tangent est un point avec certaines propriétés géométriques. Le point tangent n'est pas figé dans l'espace, mais au contraire, évolue en fonction de la position (latérale comme longitudinale) du conducteur. C'est un point particulier de la scène visuelle où la courbure du virage semble s'inverser du point de vue du conducteur. En termes de flux optique, le point tangent correspond également au point où le sens du flux horizontal change. Lors d'une étude menée sur simulateur de conduite, Mars (2008) a précisé ensuite le lien existant entre le positionnement du regard dans la scène visuelle et le guidage latéral du véhicule. Cette étude a montré l'importance de l'évolution dynamique du point tangent dans le contrôle latéral.

La modalité vestibulaire. En conduite automobile, l'appareil vestibulaire renseigne sur les accélérations du véhicule étant donné que les conducteurs se déplacent avec leur véhicule. Ces informations renseignent donc sur la dynamique du véhicule et sont particulièrement utiles en virage, car l'accélération latérale indique la vitesse de prise du virage et sa compatibilité avec la géométrie du virage. Par exemple, Reymond, Kemeny, Droulez et Berthoz (2001) ont montré le rôle de l'accélération latérale dans le réglage de la vitesse en virage.

La modalité haptique. Les informations haptiques se définissent comme la combinaison des informations tactiles et kinesthésiques. C'est pourquoi elles sont parfois nommées informations tactilo-kinesthésiques. La modalité haptique implique donc un mouvement actif de la part de l'humain. La perception haptique est sollicitée lors de l'exploration manuelle d'objets par exemple. L'utilisation de ce canal pour la transmission d'informations consiste à détourner la modalité de sa fonction principale afin d'en faire un outil pour rediriger l'attention de l'utilisateur.

La modalité auditive. L'audition est utilisée par les conducteurs afin d'évaluer l'état du véhicule ainsi que celui de l'environnement. Par exemple les sons émis par le véhicule indiquent son état de fonctionnement. Les conducteurs prennent rapidement l'habitude de changer de vitesse en fonction du régime moteur. Les pannes peuvent être détectées en fonction des bruits émis par la voiture. Du côté de l'environnement le bruit permet également de renseigner le conducteur. Par exemple il est fait usage des bruits de roulement (état de la route) ou de l'approche d'autres usagers (moto).

2.3.3.2 La tâche de conduite

Michon (1985) a proposé une organisation hiérarchique des tâches réalisées par le conducteur durant la conduite. Trois niveaux sont distingués en fonction de la pression temporelle, ainsi que de l'exigence cognitive de chacun de ces niveaux (Figure 4).

Le niveau **stratégique** est le plus haut niveau dans la hiérarchie. Les tâches exécutées ici requièrent un investissement cognitif fort. Toutefois, les conducteurs contraintes temporelles

sont plutôt faible. C'est à ce niveau que les décisions concernant la planification du parcours et le choix de l'itinéraire sont pris.

Au niveau **tactique**, les conducteurs décident des actions qu'ils vont mener dans les instants qui suivent. Les exigences cognitives sont moins importantes qu'au niveau supérieur ; en revanche les activités menées à ce niveau sont opérées sous pression temporelle. Par exemple, le choix de dépasser un autre véhicule est réalisé à ce niveau en fonction de l'analyse qui est faite de la situation (trafic, vitesse de chacun des véhicules, visibilité, etc.)

Le niveau **opérationnel** correspond à l'exécution des décisions prises aux niveaux supérieurs. Le coût cognitif associé à ce niveau est très faible contrairement aux contraintes temporelles qui sont très fortes. C'est le plus bas niveau de la hiérarchie où les conducteurs réalisent de manière souvent automatisée les actions de régulation longitudinales et latérales du véhicule (ex. : réalisation du dépassement d'un autre véhicule).

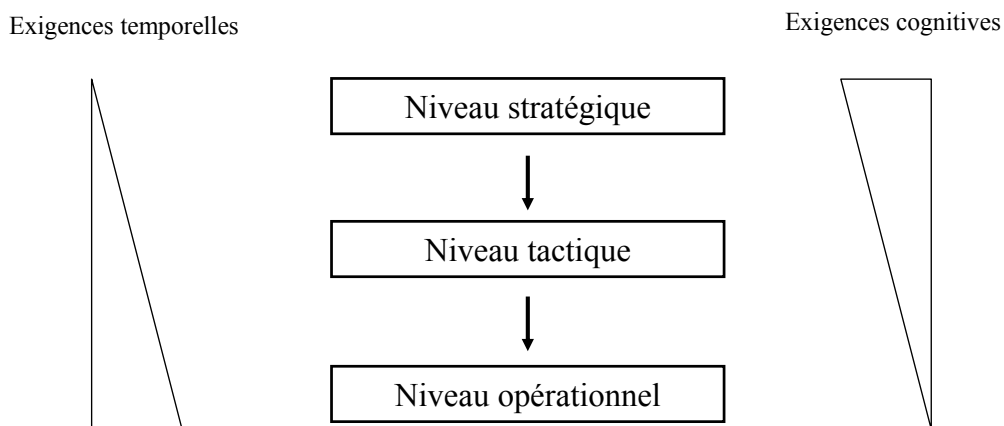


Figure 4. Modèle hiérarchique de Michon (1985) sur la tâche de conduite.

Cette catégorisation est très axée sur le comportement plutôt que sur les processus cognitifs. Elle est notamment fondée sur l'empan temporel. De ce fait, elle ne prend pas en compte l'évolution des habiletés de conduite. Par exemple, un débutant peut très bien être amené à gérer le niveau opérationnel de ce modèle au niveau symbolique de contrôle cognitif, avec un coût cognitif très élevé donc.

Donges (1978) décrit plus précisément l'activité qui nous intéresse le plus, celle du guidage du véhicule dans sa voie. Donges décompose l'activité de guidage du véhicule en deux processus parallèles alimentés par des informations visuelles distinctes. Le premier processus permet principalement un ajustement rapide de la position latérale du véhicule et concerne les informations visuelles proches des conducteurs. Le brouillard réduit par exemple la distance de vision et produit une conduite de type réactive. Les conducteurs ne peuvent pas anticiper et procèdent par de nombreuses micro-corrrections (Van der Hulst, Rothengatter, & Meijman, 1998). Le second processus décrit par Donges porte sur l'utilisation d'informations visuelles plus lointaines et permet d'anticiper la courbure de la route à échéance temporelle plus longue. Plusieurs résultats expérimentaux sont venus illustrer ce modèle.

Par exemple, Land et Horwood (1995) ont réduit expérimentalement le champ visuel des conducteurs. La scène visuelle était découpée en dix zones horizontales d'un degré d'angle visuel en hauteur. Les résultats rapportés révèlent que lorsque seule une partie lointaine de la route était visible, les conducteurs adoptaient des trajectoires latérales bien lisses

(positionnement latéral sans à-coup) pour les virages dans leur ensemble. Toutefois, d'un point de vue plus microscopique, des écarts latéraux important du véhicule dans la voie étaient observés. À l'inverse, lors de la seule présence d'informations visuelles proches, les trajectoires latérales empruntées n'étaient pas lisses pour les virages dans leur ensemble, mais le véhicule était maintenu à proximité du centre de la voie.

2.3.3.3 Relation entre contrôle et erreurs

Pour terminer ce chapitre, nous allons développer les liens existants entre contrôle de l'activité et erreur. Le lien entre erreur et accident n'est pas nécessairement direct. Certaines erreurs ne sont pas nécessairement causes d'accidents et à de la même façon, certains accidents n'ont pas pour origine une erreur humaine. Les causes des accidents sont donc nombreuses variées et les explications sont à chercher dans des analyses de type systémique (Amalberti, 1996).

Sans vouloir détailler les analyses issues de l'accidentologie, il nous semble nécessaire d'introduire le type d'erreur visé par les assistances à la conduite que nous allons étudier afin de cerner les situations d'usages dans lesquelles elles sont censées intervenir. Notre propos est donc de préciser que nous nous intéressons à une situation bien particulière, celle ayant pour principale cause une erreur humaine. Tout cela nous conduira donc à délimiter les contours de notre travail. Par exemple, nous n'allons pas étudier les conduites à risque, telles que la conduite sous emprise d'alcool ou de drogues. Ces conduites à risque ont un objectif contraire à celui visé par les assistances, augmenter les prises de risques pour diverses raisons psychosociales (jeunes conducteurs).

Dans les études d'accidentologie, Rumar (1985) a indiqué que 90 à 95% des accidents de la route sont liés à une erreur humaine. En 2003 sur 855 000 accidents de la route, environ un quart de ceux ayant conduit à des blessures ou à des décès au Canada, en France, en Allemagne et dans les Pays-Bas ont été identifiés comme étant reliés à un seul véhicule (24%). Ces accidents n'impliquent donc pas de difficultés liées à la gestion du trafic. Ce pourcentage s'élève à 36% quand les accidents en zone urbaine sont exclus de l'analyse (UNECE, 2007). Enfin, aux Etats-Unis 66% des accidents de la catégorie « n'impliquant qu'un seul véhicule léger » ont été associés à des sorties de voie involontaire (Najm *et al.* 2007).

En reprenant le modèle de Rasmussen (1983), Reason (1990/1993) a introduit une typologie des erreurs humaines. Cette typologie met l'accent sur le processus de contrôle de l'activité dominant au moment de la survenue de l'erreur.

Les fautes sont associées aux erreurs survenues dans des tâches impliquant un certain degré de contrôle symbolique alors que les ratés sont associés aux activités automatiques. Les ratés prennent donc place dans l'action, au niveau des automatismes (*skill-based behaviors* dans la terminologie de Rasmussen). Pour ce type d'erreur, le comportement n'est pas mauvais en lui-même, c'est la supervision de ce comportement qui est soit omise (inattention) soit introduite au mauvais moment (attention excessive). C'est donc le résultat d'un défaut de supervision ou l'introduction d'un contrôle symbolique au mauvais moment dans une routine.

Les ratés dans le guidage du véhicule conduisent à des sorties de voie involontaires. Les automatismes mis en place dans la tâche de guidage du véhicule ne sont pas adaptés à la situation et conduisent donc à un accident. Ce peut être à cause d'une vitesse trop élevée par exemple ou d'une mauvaise gestion de la trajectoire. De plus, Il est communément accepté que la conduite ne puisse être considérée comme une tâche continue de contrôle précis du volant. De micro-erreurs sont régulièrement rattrapées, mais lors d'un défaut de supervision (inattention) ces micro-erreurs peuvent se cumuler jusqu'à aboutir à une sortie de voie. Ensuite, les conducteurs sont parfois forcés de prêter attention à d'autres aspects de la tâche

de conduite. Ainsi, par définition, cela ne permet pas au conducteur de passer tout son temps disponible sur la tâche de contrôle du volant (Godthelp, Milgram, Blaauw, 1984).

Ainsi, dans l'idée du constat exprimé par Rumar (1985), du rôle écrasant du facteur humain dans la causalité des accidents de la route, plusieurs pistes sont explorées pour réduire ces accidents. Les solutions les plus connues et employées aujourd'hui sont celles de la prévention, de la formation ou de la répression. Les campagnes d'information sur les dangers de l'alcool au volant ou sur la nécessité de faire des pauses toutes les deux heures sont un bon exemple de solution imaginées quant à la prévention. La multiplication des radars automatiques sur les routes françaises illustre quant à elle l'aspect répressif des solutions envisagées. En complément de ces actions, de nouvelles voies possibles de progrès dans la diminution des accidents se sont ouvertes avec les avancées de l'automatique et de l'informatique. Les constructeurs automobiles imaginent désormais de nouvelles façons d'aider les conducteurs en les assistant lorsqu'ils sont faillibles. Ce sont les assistances à la conduite.

2.4 Références

- Anderson, J.R., Bothell, D., Byrne, M.D., Douglass, S., Lebiere, C., & Quin, Y.L. (2004). An integrated theory of the mind. *Psychological Review*, 111, 1036-1060.
- Amalberti, R. (1996). *La Conduite des systèmes à risque*, Coll. Le Travail Humain, Paris, Presses Universitaires de France.
- Authié, C. (2011). *Contrôle visuel du déplacement en trajectoire courbe : approche sensorimotrice du rôle structurant du flux optique*. Thèse, Université de la Méditerranée Aix-Marseille, France.
- Bainbridge, L. (1989). Development of Skill, Reduction of Workload. In : L. Bainbridge and S.A. Ruiz Quintanilla, Eds, *Developing Skills with Information Technology* (pp. 87-116). Chichester: Wiley.
- Broadbent, D.E. (1957). A mechanical model for human attention and immediate memory. *Psychological Review*, 54, 205-215.
- Cellier, J.M., De Keyser, V., & Valot, C. (1996) *La gestion du temps dans les environnements dynamiques*, Paris : PUF.
- Deborne, R., (2009). Modélisation de l'adaptation des conducteurs au comportement du véhicule et expérimentations sur simulateur. *Thèse de doctorat*. Ecole centrale de Paris.
- Donges, E. (1978). A two-level model of driver steering behaviour. *Human Factors*, 20, 691-707.
- Fitts, P.M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47, 381-391.
- Fodor, J. (1983) *The modularity of mind*. MIT/Bradford Books.
- Godthelp, H., Milgram, P., & Blaauw, G. J. (1984). The Development of a Time-Related Measure to Describe Driving Strategy. *Human Factors*, 26, 257-268.
- Held, R. (1965). Plasticity in sensory-motor systems. *Scientific American*, 213, 84-94.
- Hoc, J.M. (1987). *Psychologie cognitive de la planification*. Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble.
- Hoc, J.M. (1996). *Supervision et contrôle de processus*. Grenoble : PUG.

- Hoc, J.M., & Amalberti, R., (2007). Cognitive Control Dynamics for Reaching a Satisficing Performance in Complex Dynamic Situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1, 22-55.
- Land, M. F., & Horwood, J. (1995). Which parts of the road guide steering? *Nature*, 377, 339-340.
- Land, M.F. & Lee, D.N. (1994) Where we look when we steer. *Nature* 369, 742–744.
- Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models. What do we know, what should we do? In L. Evans & R. Schwing (Eds.), *Human behavior and traffic safety* (pp. 485-525). Plenum press, New York.
- Mestre, D.R. (2004). Activités sensori-motrices: apports de la réalité virtuelle à la psychologie ergonomique. In J.-M. Hoc & F.Darses (Eds.), *Psychologie ergonomique: tendances actuelles* (pp. 201 – 220). Paris : Presses Universitaires de France.
- Luria, A.R. (1966). *Higher cortical functions in man*. New York: Basic Books Inc Publishers.
- Minoiu Enache, N. (2008). Assistance préventive à la sortie de voie. *Thèse de doctorat*. Université d'Evry-Val-d'Essone.
- Najm, W. G., Smith, J. D., & Yanagisawa, M. (2007). *Pre-crash scenario typology for crash avoidance research*. (Tech. Rep. DOT-HS-810 767). Washington, DC: National Highway Transportation Safety Administration Research.
- Norman, D. A. (1988). *The Psychology of Everyday Things*. New York: Basic Books.
- Pompanon, C. (2009). *De la perception de l'action: Modélisation et simulation de la détection de conflit sur radar chez les contrôleurs aériens "en-route" dans l'architecture cognitive ACT-R*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- Reymond, G., Kemeny, A., Droulez, J., & Berthoz, A. (2001) Role of lateral acceleration in curve driving: driver model and experiments on a real vehicle and a driving simulator. *Human Factors*, 43, 483–495
- Reason, J. (1993). *L'erreur humaine* (J. M. Hoc). Paris : Presses Universitaires de France. (ouvrage original paru en 1990).
- Reinkensmeyer, D.J., & Patton, J.L. (2009). Can robots help the learning of skilled actions? *Exercise and Sports Sciences Reviews*, 37, 43-51.
- Rumar, K. (1985). The role of perceptual and cognitive filters in observed behaviour. In L. Evans and R. C. Schwing (Eds.), *Human Behaviour and Traffic Safety* (pp. 151-165). Plenum Press, New York.
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing. I. Detection, search, and attention. *Psychological Review*, 84, 1–66.
- Sivak, M. (1996). The information that drivers use: Is it indeed 90% visual? *Perception*, 25, 1081–1089.
- Summala, H., Nieminen, T., & Punto, M. (1996). Maintaining lane position with peripheral vision during in-vehicle tasks. *Human Factors*, 38, 442-451.
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving : Effects on learning. *Cognitive Science*, 12, 257-285.
- UNECE. (2007). *Statistics of Road Traffic Accidents in Europe and North America*, 51st ed. UNECE, Geneva, 46–61.

- Van der Hulst, M., Rothengatter, T., & Meijman, T. (1998). Strategic adaptations to lack of preview in driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 1, 59-75.
- Varela, F. (1989). *Invitation aux Sciences Cognitives*. Editions du Seuil, Paris.
- Vercher, J.L., Sares, F., Blouin, J., Bourdin, C., & Gauthier G. (2003). Role of sensory information in updating internal models of the effector during arm tracking. *Progress in Brain Research*, 142, 203-222.
- Wolpert, D.M., Ghahramani, Z., & Jordan, M.I. (1999). An internal model for sensorimotor integration. *Science*, 269, 1880-1882.

Chapitre 3 - Les automates et leurs effets sur l’opérateur humain

« Vos enfants vivront entourés de machines ; il faut qu'ils les comprennent et soient avec elles familiers. Les machines traitent très mal ceux qui ne les aiment pas. »

Lettres à l’inconnue, 1956, **André Maurois**

SOMMAIRE

- 3.1 L’automatisation
 - 3.2 Les stratégies de conception
 - 3.3 La coopération homme-machine dans la conduite automobile
 - 3.4 Les trajectoires acceptables et sécurisées
 - 3.5 Les assistances utilisées dans le cadre de cette étude
 - 3.6 Synthèse des questions de recherche
 - 3.7 Références
-

3.1 L’automatisation

Nous avons assisté aux progrès exponentiels de l’informatique, qui se sont traduits par le développement de l’informatique grand public. Avec le développement de la technique, et de la complexité allant de pair, le besoin d’adapter la machine à l’homme s’est alors fait sentir. L’ergonomie des interactions hommes-machines s’est donc développée. Ces recherches ont exploré la relation homme-machine en étudiant les effets que différents aspects de l’interface pouvaient avoir sur toutes sortes d’activités d’utilisateurs. Citons par exemple le cas de l’aide à l’apprentissage procurée par le multimédia (Jamet, Gavota & Quaireau, 2008) ou encore de la navigation dans les hypertextes (Rouet & Amadieu, 2011). En s’inspirant des modèles issus de la psychologie cognitive, tels que la résolution de problèmes, l’ergonomie des interactions homme-machine a produit, et produit toujours, un corpus de connaissance permettant de

faciliter cette interaction, de poser les questions liées à l'utilité de la technique, à son utilisabilité ainsi qu'à son acceptabilité. Enfin, le fait que dans ces situations, la machine n'agisse pas sans intervention de l'opérateur a conduit la recherche en ergonomie à étudier principalement l'opérateur afin d'adapter la machine à ce dernier.

Toutefois, des machines de plus en plus autonomes, des automates, agissant sans intervention directe de l'être humain, s'intègrent de plus en plus dans notre quotidien. Un automate est un dispositif se comportant de façon automatique, c'est-à-dire sans intervention humaine. Ce comportement peut être figé, il fera toujours la même chose, ou dynamique, il s'adaptera à son environnement. Les automates sont de plus en plus fréquents et interviennent à la fois dans toutes sortes d'activités de la vie quotidienne.

La question du contrôle que nous avons développée précédemment revêt alors une importance capitale dès lors que la machine devient autonome et capable d'agir d'elle-même dans l'environnement, sans action préalable de l'opérateur. Afin de développer le côté applicatif de cette thèse, nous allons commencer par présenter les différentes stratégies de conception d'automates et de répartition de l'activité entre l'homme et la machine. Ensuite nous détaillerons l'approche systémique que nous avons choisie, à savoir celle de la coopération homme-machine. Enfin nous présenterons les dispositifs d'assistances sélectionnés afin d'étudier le contrôle cognitif de l'activité dans une situation de coopération homme-machine. Pour terminer nous résumerons les questions de recherches intégrant les apports des chapitres 2 et 3.

3.2 Les stratégies de conception

3.2.1 Stratégie centrée sur la machine

Les premières solutions proposées pour intégrer les assistances dans l'activité des opérateurs (Fitts, 1951) furent d'attribuer à chaque agent la fonction dans laquelle il était jugé le plus performant. La machine est par exemple jugée plus efficace en calcul, et l'homme à la confrontation à des situations inconnues. Néanmoins, une telle approche a été maintes fois critiquée (Hoc & Chauvin, 2011 ; Hollnagel & Woods, 2005).

Tout d'abord il est difficile de définir chaque tâche en termes de fonctions élémentaires, ce qui conduit à la nécessité d'intégrer plusieurs fonctions dans la réalisation de chacune des tâches et donc à une confrontation à de fréquentes coopérations entre les agents pour la réalisation de cette tâche.

Ensuite, l'être humain sera toujours en dernier recours responsable (légalement) de la performance globale du système homme-machine. Et de ce fait, même en allouant les fonctions de bas niveau à la machine, l'être humain doit rester en charge de la supervision de l'ensemble du processus afin d'éviter d'être dépassé par la situation (syndrome du « *human-out-of-the-loop* »).

Enfin, la définition des fonctions est très sensible aux théories cognitives sous-jacentes, qui peuvent être en contradiction les unes avec les autres, et changeantes au fil des avancées scientifiques. Tout d'abord les machines sont de plus en plus perfectionnées et sont capable d'être plus efficace que l'être humain sur des fonctions qui étaient attribuées à l'être humain en 1951. Ensuite, les connaissances sur la cognition humaine évoluent et les modèles utilisés peuvent redéfinir régulièrement le concept de fonction ainsi que les processus cognitifs qui y sont associés.

Bainbridge (1987) a signé un des meilleurs exemples argumentant cette illusion de pouvoir répartir les fonctions entre l'homme et la machine de cette façon. Son chapitre intitulé

« *ironies of automation* » décrit de quelle façon l'intégration inadaptée d'automates crée les conditions des défaillances humaines. Notons tout de même que le propos n'est pas de dire que cette approche d'une répartition des fonctions est inutile, elle peut l'être dans le cas de tâches simples, mais qu'elle est néanmoins inadaptée dans le cadre des tâches complexes. En effet, pour ces dernières, l'opérateur doit généralement partager son attention entre diverses sous-tâches. Or, la supervision de plusieurs d'entre elles, dont les fonctions seraient réparties entre différents agents, pourrait rapidement provoquer une surcharge de la mémoire de travail.

Contrairement aux propositions de Fitts (1951), Sheridan et Verplanck (1978) proposèrent une stratégie de conception consistant à définir des niveaux d'automatisation et non pas directement une répartition des fonctions. C'est ensuite ce choix du niveau d'automatisation qui produit une répartition des fonctions (Tableau 1). Cette description est davantage intégrée que celle de Fitts mais est centrée uniquement sur ce que doit faire la machine, sans description des conséquences dans la réalisation de l'activité et de son contrôle pour l'opérateur. Ainsi, rien n'est dit sur le rôle de l'être humain dans le contrôle de la situation. Par exemple, l'opérateur peut très bien être à la fois exclu du contrôle physique du processus tout en obtenant un rôle plus important en tant que superviseur dans le cas où il est à l'origine de la décision du niveau d'automatisation à appliquer à la tâche en cours. Encore une fois c'est donc une stratégie centrée sur la machine qui est proposée dans ce modèle.

Tableau 1 - Niveau d'automatisation (LOA – level of automation) proposé par Sheridan et Verplanck (1978).

Niveau d'automatisation	Répartition de fonction
1	La machine n'offre pas d'assistance ; l'opérateur doit tout faire.
2	La machine propose toutes les solutions possibles, et
3	Réduit le nombre de solutions, ou
4	En suggère une, et
5	L'exécute si l'opérateur est d'accord, ou
6	Autorise à l'opérateur une durée de réflexion limitée pour exercer un droit de veto avant d'exécuter la solution automatiquement, ou
7	L'exécute automatiquement, puis en informe l'opérateur, ou
8	Informe l'opérateur après son exécution seulement si l'opérateur le demande, ou
9	Informe l'opérateur après exécution seulement si la machine le décide, ou
10	La machine décide de tout et agit en autonomie, en ignorant l'opérateur.

3.2.2 Stratégie centrée sur l'opérateur humain

Classiquement en ergonomie, il est proposé de centrer la conception sur l'être humain. Par exemple, il est courant de parler de conception centrée utilisateur lorsque l'on s'intéresse aux systèmes d'informations. De nombreux ergonomes sont par exemple recrutés pour travailler à une conception centrée utilisateur de sites Internet ou de logiciels. Cette stratégie se concentre sur les informations à fournir aux opérateurs et aux actions que ces derniers vont pouvoir exercer en retour sur la machine.

Cette stratégie est tout à fait adaptée dès lors que la machine n'est pas autonome et se contente de renvoyer des *feed-backs* à l'être humain. Toutefois, dès lors qu'une part d'autonomie lui est allouée, le problème de la répartition des fonctions revêt un caractère

essentiel. Cette stratégie ne peut donc être reproduite telle qu'elle lorsque l'on s'intéresse aux interactions avec des automates. Enfin, cette stratégie possède un inconvénient majeur. En considérant l'activité de l'être humain comme référentiel, elle s'apparente à une stratégie reproductive. Il est par exemple très facile de tomber dans le biais de voir l'activité humaine comme étant la meilleure, et, de ce fait, de ne pas s'intéresser à une vision globale du système homme-machine. Pourtant, cette vision globale pourrait aboutir à concevoir un système homme-machine présentant de bien meilleures performances, mais nécessiterait de concevoir une évolution dans l'activité de l'opérateur humain.

3.2.3 Stratégie centrée sur le système homme-machine

Hoc (2000, 2001) a introduit l'idée que si les réflexions sur les interactions homme-machine « *Human-Computer Interaction* » (HCI) sont pertinentes, dans de nombreux cas, elles ne permettent pas, du fait de la seule notion d'« interaction », d'appréhender toute la complexité de la relation que l'homme peut désormais entretenir avec la machine. De ce fait, la recherche en ergonomie cognitive s'est intéressée à de nombreux cas de dysfonctionnements n'ayant pas pour causes les seuls aspects de surface de la machine, c'est-à-dire son interface. Du point de vue de l'opérateur humain, la machine n'est pas toujours un simple outil. En effet, elle est parfois considérée comme un véritable agent autonome, avec lequel il est nécessaire de s'accorder. C'est pourquoi le cadre théorique de la coopération nous semble pertinent de ce point de vue afin de couvrir, entre autres, le champ des situations dynamiques.

Les situations dynamiques ont notamment la particularité de présenter un certain degré d'incertitude, parfois associé à un niveau de risque élevé. En effet, elles ne sont d'une part que partiellement contrôlées, du fait de leur dynamique propre, et d'autre part les coûts des erreurs dans ces situations peuvent être très élevés. Par conséquent, dans ces situations, l'objectif principal est de maintenir un niveau de performance acceptable, c'est-à-dire qui ne peut être optimal. Les critères d'optimisations qui entrent dans la performance acceptable vont dépendre de la situation, certains vont disparaître et d'autres vont émerger. Cet objectif inclut donc de laisser un certain degré de liberté au système afin de permettre aux différents agents de s'adapter et d'atteindre un compromis acceptable entre la compréhension de la situation et son contrôle (Amalberti, 1996). Ainsi, la répartition des stratégies, procédures ou fonctions ne doit pas être trop rigide entre l'homme et la machine, et de ce fait, les théories de la communication et de la coopération sont progressivement venues enrichir les recherches sur l'interaction homme-machine dans le cadre de ces situations.

La notion de systèmes cognitifs couplés (*Joint Cognitive Systems*) (Hollnagel et Woods 1983) fût un premier pas vers la conception d'une coopération entre l'homme et la machine. Cette notion introduisait l'idée qu'il était inefficace et inadapté de considérer l'homme ou la machine isolément. A l'inverse, il défendait la nécessité d'appréhender le système global comme œuvrant dans la réalisation d'une tâche commune, qui elle-même pouvait ensuite être dynamiquement décomposée en sous-tâches.

3.2.3.1 Définition de la coopération homme-machine

Si l'idée d'utiliser des cadres théoriques originellement dédiés aux relations entre les hommes dans l'interaction homme-machine peut sembler chimérique et relever de l'anthropomorphisme, elle nous paraît néanmoins nécessaire pour résoudre certaines des difficultés liées aux types de relations entretenues parfois entre l'homme et la machine. C'est l'idée introduite par Millot et Lemoine (1998) qu'après avoir muni les machines de savoir-faire (*know-how*), il était maintenant nécessaire de les munir d'un savoir-coopérer (*know-how-cooperate*).

Si toute la complexité de la compétence de la coopération homme-homme ne peut être transférée sur le système homme-machine, il semble néanmoins raisonnable d'envisager à moyen terme de transférer les aspects cognitifs de cette compétence aux machines (Hoc, 2000). Des travaux récents parlent même d'en transférer les aspects affectifs (Picard, Vyzas & Healey, 2001).

Nous nous situons ainsi dans un cadre fonctionnel de la coopération, plutôt que dans un cadre structurel, car nous considérons qu'une situation de coopération apparaît lorsqu'au moins deux agents (humains ou technologiques) remplissent deux conditions minimales (Hoc, 2001). Tout d'abord, ils interfèrent entre eux et, de plus, ils essaient de faciliter leurs tâches individuelles et leur tâche commune, qui est ici le maintien du véhicule dans des limites de trajectoires acceptables.

Du point de vue cognitif, la gestion des interférences est réalisée par le biais des activités coopératives. Ces activités coopératives peuvent s'organiser en trois niveaux, impliquant une augmentation du degré d'abstraction et un élargissement de la durée de référence :

La **coopération dans l'action** regroupe les activités qui ont une implication sur le court terme et qui impliquent un niveau local d'interférence.

La **coopération dans la planification** consiste à maintenir et/ou à élaborer un référentiel commun (*Common Frame of Reference*). Un certain niveau d'abstraction est donc nécessaire pour développer et déterminer l'action de l'équipe à moyen terme.

Enfin, la **méta-coopération** permet aux agents d'améliorer la coopération sur le long terme par la construction d'un modèle de soi-même et des autres agents. Ce niveau implique le plus haut niveau d'abstraction.

Même si les activités coopératives des machines restent limitées, il est nécessaire qu'elles contribuent aux moins à faciliter les activités coopératives des opérateurs. Le développement d'outils pour maintenir un référentiel commun entre les hommes et les machines est probablement un premier pas important vers un tel but. Revient alors l'importante question de la façon d'informer l'opérateur sans surcharger sa mémoire de travail.

Pour étudier le contrôle de l'activité dans laquelle interviennent des automates, nous choisissons de nous positionner dans le cadre théorique de la coopération homme-machine. L'intégration d'assistance dans le véhicule modifie en effet le rapport que le conducteur va avoir avec ce dernier. Il peut ainsi être désormais considéré comme un agent autonome, avec lequel il est nécessaire de coopérer, et pour ce qui nous occupe, dans le contrôle de la trajectoire.

3.2.4 Difficultés misent en avant dans le système homme-machine

Hoc (2000) précise que dans la gestion des environnements dynamiques, plusieurs types de dysfonctionnement peuvent être relevés, qui n'ont pas seulement comme cause des défauts d'interfaces, mais qui ont également une explication dans la coopération homme-machine.

Ces dysfonctionnements peuvent être regroupés sous l'appellation du **syndrome de l'humain hors de la boucle** (*human-out-of-the-loop*). Endsley et Kaber (1999) décrivent plusieurs facteurs pouvant aboutir à ce syndrome.

Enfin, citons également la **perte d'expertise**, qui peut apparaître lors d'une trop grande délégation de l'activité à la machine. Le manque de confrontation à des situations d'exercice provoque alors de faibles performances de la part des opérateurs qui sont obligés de reprendre le contrôle du système lorsque ce dernier atteint ses limites. Dans ce cas, la coopération avec la machine n'est plus possible.

Tout d'abord, le phénomène de **contentement** (*complacency*) a été à de nombreuses reprises cité dans le cas de relations opérateurs-machines « intelligentes ». Le contentement est décrit comme un état psychologique caractérisé par un faible niveau de suspicion quant aux productions de la machine (Wiener, 1981). Cela correspond donc à un état dans lequel l'opérateur, suffisamment expert et raisonnablement conscient des limites de la machine, se contente des solutions qui lui sont proposées, sans les remettre en question. Lee (2006) associe ainsi le contentement à un problème d'attitude vis-à-vis du dispositif.

Enfin, il est possible d'observer **une perte de la conscience de la situation** (*situation awareness*), dans le sens proposé par Endsley (1995). Stanton et Young (1998) ont par exemple montré ce type de problème avec l'ACC (*Adaptive Cruise Control*). L'ACC est un régulateur de vitesse capable de modifier la consigne de vitesse en fonction de celle du véhicule suivi. L'utilisation de ce dispositif peut aboutir à une diminution de la conscience de la situation et provoquer une dégradation de la performance dès lors que les limites de l'automate sont dépassées, lors d'un freinage intense en urgence par exemple.

Ainsi de façon générale, toutes ces défaillances dans la coopération homme-machine réduisent la capacité d'adaptation du système homme-machine à des situations non prévues par les concepteurs. De ce fait, la coopération est un ingrédient essentiel dans le potentiel d'adaptation du système homme-machine. En reprenant les idées de Bainbridge (1987), Lee (2006) synthétise les discussions à ce sujet en relevant un paradoxe qu'il nomme « *clumsy automation* ». Ce paradoxe décrit la tendance existante qui consiste à simplifier les tâches simples et à complexifier les tâches complexes. Autrement dit, ce qui est simple pour l'opérateur est généralement simple à automatiser, et est automatisé. Par contre, ce qui est complexe pour l'opérateur est souvent ignoré par les automates. L'opérateur se retrouve ainsi seul, et parfois dépourvu, devant cette complexité, du fait des dysfonctionnements du système homme-machine que nous venons de détailler (perte d'expertise, contentement, humain en dehors de la boucle).

3.3 La coopération homme-machine en conduite automobile

Une autre façon de concevoir les relations homme-machine consiste donc à avoir une approche systémique. Hoc et Chauvin (2011) précisent en effet que distribuer des fonctions entre humains et machines crée des interférences positives et négatives entre les deux agents. Or, la gestion de ces interférences est le cœur de la coopération. Travailler à améliorer le système homme-machine consiste donc à travailler sur les interférences (positives ou négatives) au sein du système.

Hoc, Young et Blosseville (2009) proposent une catégorisation des assistances à la conduite en termes de coopération homme-machine. Ce cadre repose sur quatre présupposés. Premièrement, le développement croissant de l'automatique dans les véhicules automobiles permet désormais de parler de coopération homme-machine. Deuxièmement, les assistances à la conduite sont envisagées comme des aides et non comme des substitutions au conducteur. Troisièmement, ce cadre théorique se distingue nettement de la hiérarchie en niveau d'automatisation précédemment introduite par Sheridan et Verplanck (1978), en se basant non plus sur la répartition des fonctions entre l'homme et la machine, mais sur les modifications de l'activité humaine qu'implique la coopération entre l'homme et l'automate. L'aide apportée par l'assistance à la conduite est alors dépendante d'une bonne coopération homme-machine.

Dans ce cadre théorique, Hoc et al. (2009) catégorisent les assistances à la conduite en quatre modes de coopération. Ils distinguent le mode perceptif, le mode contrôle mutuel, le mode

délégation de fonction et le mode entièrement automatisé. Ces modes étant eux-mêmes décomposés en plusieurs sous-modes.

Le mode perceptif consiste à aider le conducteur en fournissant un complément d'information afin d'améliorer sa perception de l'environnement (Figure 5). Ce mode peut consister à rehausser perceptivement des informations présentes dans la scène visuelle, afin de les rendre plus saillante (Mars, 2008) ou à afficher des informations non perceptibles directement par le conducteur. Par exemple, un affichage tête haute des bords de voie lors d'une conduite de nuit ou par brouillard permet de faciliter la tâche de maintien dans la voie. La création de sons artificiels dans les véhicules électriques afin de renvoyer des perceptions de vitesse est une autre illustration de ce mode perceptif agissant sur la modalité auditive.



Figure. 5. Illustration d'un rehaussement perceptif d'un piéton en bord de voie lors de la conduite de nuit.

Le mode de contrôle mutuel s'apparente à la vérification de l'activité d'un agent par un autre agent afin de fournir au premier une évaluation de son activité, par exemple un avertissement (Wiener, Kanki & Helmreich, 1993). Généralement, dans la conduite automobile, c'est une critique des actions du conducteur par l'automate qui est envisagée. Classiquement ce mode correspond aux dispositifs de type avertissement qui consistent à alerter le conducteur d'un danger imminent. Dans la littérature, la terminologie LDWS est régulièrement employée pour décrire ce type de dispositif (*Lane Departure Warning System*).

La délégation de fonction correspond aux cas dans lesquels le conducteur décide de confier une partie de l'activité à l'assistance. Le conducteur est donc co-acteur dans l'activité mais il agit sur une autre variable que celles sur lesquelles agit le conducteur. Par exemple, la vitesse peut être déléguée à l'automate (régulateur de vitesse), tandis que le conducteur s'occupe de la direction et de la supervision du système homme-machine dans son ensemble. La tâche n'est pas entièrement déléguée. De plus, il obtient un nouveau rôle, celui de superviseur du système homme-machine. Il lui revient en effet la tâche de décider quand, et pour combien de temps, la machine doit effectuer une partie de l'activité. Cela implique donc une supervision de l'action de l'automate afin de d'évaluer si ce qui est fait correspond bien aux objectifs du conducteur, ainsi qu'à la dynamique de la situation.

Enfin, **le mode complètement automatisé** implique une délégation totale à la machine de la tâche de conduite. Dans le cadre de la conduite automobile, ce mode ne décrit pas forcément une délégation totale permanente, mais plutôt occasionnelle. Par exemple, ce peut être le cas lorsque les risques sont très élevés (contrôle latéral délégué à la machine pour une traversée

de tunnel) ou que la machine juge que le conducteur sera incapable de guider convenablement son véhicule dans des délais très courts (freinage d'urgence).

Plus récemment, Hoc et Chauvin (2011) ont revisité cette classification en intégrant un nouveau mode de coopération homme-machine, qu'ils ont intitulé « contrôle partagé » (figure 6).

Le mode de contrôle partagé correspond à un mode intermédiaire entre le contrôle mutuel et la délégation de fonction. Pour Sheridan (1992), le partage du contrôle entre l'homme et la machine signifie qu'un travail commun et simultané est réalisé. Ainsi, dans ce mode, les deux agents agissent simultanément (contrôle partagé continu) ou alternativement (mode correctif) sur la variable contrôlée, la trajectoire par exemple.

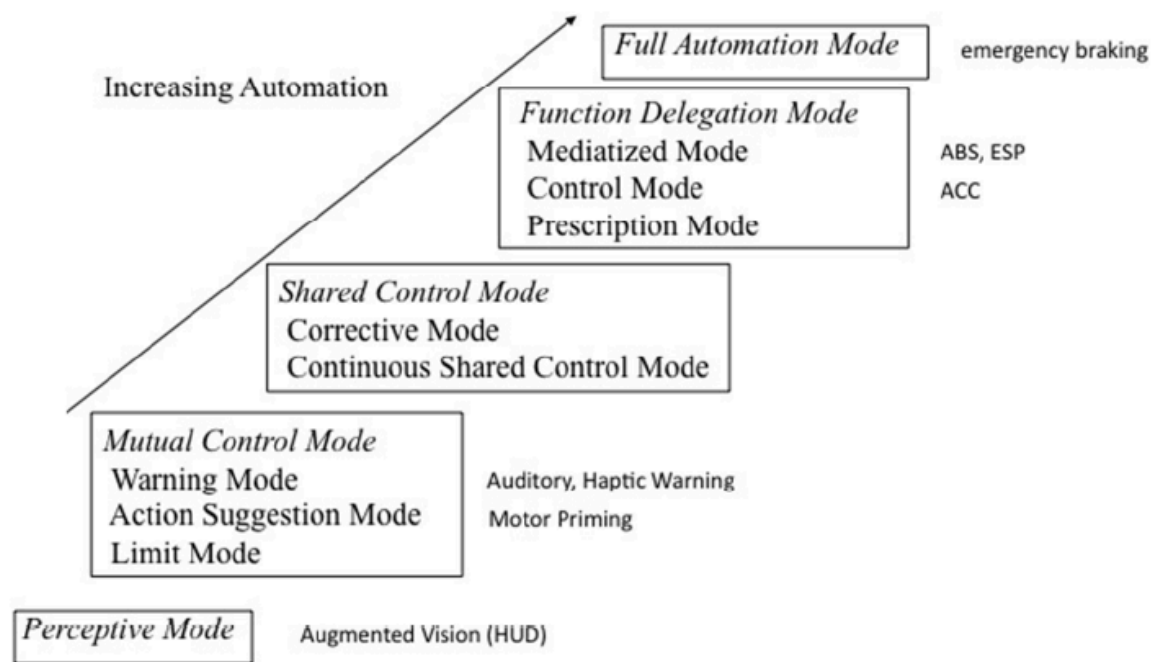


Figure. 6. Catégorisation des modes de coopération homme-machine (Hoc & Chauvin, 2011).

3.3.1 Articulation entre modes de coopération et fonctionnement cognitif

Précédemment, Parasuraman, Sheridan et Wickens (2000) ont décrit le degré d'automatisation en termes de niveau d'automatisation mais également de processus sur lequel l'automatisation est censée intervenir. Ces auteurs ont donc repris l'idée de niveaux d'automatisations (LOA) proposée par (Sheridan & Verplank, 1978) allant du moins automatisé à l'automatisation totale. Ils affinent ensuite ce modèle en proposant de catégoriser les types d'automatisation en fonction de quatre classes de processus cognitifs, schématisant le fonctionnement cognitif humain. L'opérateur est ainsi intégré dans l'analyse. Ces processus cognitifs sont : 1) l'acquisition d'information, 2) l'analyse de l'information, 3) la décision et la sélection d'action et 4) l'implémentation de l'action.

Un système est ainsi décrit en fonction du degré d'automatisation dans chaque processus proposé. Enfin, bien que cette description du fonctionnement cognitif humain soit très schématisée, cela permet de distinguer les processus sur lesquels interviennent les automates.

“Our goal is not to debate the theoretical structure of the human cognitive system but to propose a structure that is useful in practice.”

La proposition de modes de coopération homme-machine proposée par Hoc et al. (2009) et Hoc et Cauvin (2011) pourrait correspondre à une catégorisation des classes d'assistances à la conduite en fonction de leur niveau d'automatisation dans chacun des processus cognitifs du modèle de Parasuraman et al. Par exemple, le mode perceptif correspond à un LOA (*level of automation*) élevé dans le processus d'acquisition uniquement. Dans le mode de contrôle mutuel, l'avertissement est une intervention dans les processus d'analyse de l'information alors que la suggestion d'action agit davantage sur le processus de prise de décision. Enfin, les modes contrôle partagé et délégation de fonction (totale ou partielle) agissent directement dans l'implémentation de l'action.

Le regroupement de ces deux modèles nous permettra ainsi de préciser la catégorie d'assistance étudiée ainsi que les processus cognitifs influencés par l'automate.

3.4 Les trajectoires acceptables et sécurisées

Nous avons discuté du système homme-machine et de la façon de répartir l'activité entre l'homme et la machine. Un autre aspect très important est celui du référentiel utilisé dans la réalisation de la tâche par chacun des agents. Concevoir un système homme-machine ayant pour tâche de maintenir le véhicule sur la voie nécessite, en effet, de prendre en compte des références différentes à propos de l'évaluation de la trajectoire. Les conducteurs ont certaines références et peuvent considérer qu'une trajectoire est acceptable, alors que du point de vue de la géométrie de la route, cette trajectoire peut être considérée comme dangereuse. Par exemple, la tendance des conducteurs à redresser les virages illustre le décalage qui peut exister entre un conducteur et une analyse purement géométrique de la situation (Coutton-Jean, Mestre, Goulon & Bootsma, 2009).

La référence utilisée par l'automate pour baser son diagnostic sur la situation peut alors être plus ou moins complexe. La référence la plus simple peut être un écart au centre de la voie ou un écart par rapport au bord de voie. Toutefois, des références plus complexes peuvent être produites, consistant à intégrer divers paramètres dans le calcul d'une référence.

L'idéal serait alors de concevoir une référence pour l'automate qui permette à la fois des gains de sécurité pour le système homme-machine, en comparaison d'un conducteur seul, tout en étant acceptable pour les deux agents. (Mars, Saleh, Chevrel, Claveau & Lafay, 2011 ; Saleh, Chevrel, Mars, Lafay & Claveau, 2011).

La trajectoire optimale du système homme-machine doit être un compromis entre les trajectoires produites par les deux agents pris isolément. Ce compromis nécessite alors de discuter de la question de l'autorité dans le système homme-machine. Cette question de l'autorité revêt en effet un caractère important dès lors que l'on s'intéresse à des machines autonomes et que l'on situe l'analyse des interactions dans le cadre de la coopération homme-machine. L'autorité est en effet une caractéristique importante dans l'organisation de la coopération.

3.4.1 La problématique de l'autorité

Si l'on interroge le petit Larousse, l'autorité signifie « droit ou pouvoir de commander, de se faire obéir ». Si l'on se penche sur l'étymologie, autorité nous renvoie à *auteur*, du latin *auctorem*. L'autorité se distingue de la responsabilité qui renvoie au fait de devoir répondre de ses actes. Dans le cadre de la coopération homme-machine, nous définissons donc l'autorité comme le fait d'être auteur de ses actes et du fait que ces actes ont le pouvoir d'influencer les actes d'un autre agent. Cette influence étant plus ou moins forte, il s'agira alors de parler de degré d'autorité, un avertissement n'ayant, en effet, pas le même pouvoir d'influence qu'une action directe sur le dispositif de commande, ou sur la variable à contrôler.

La hiérarchie de niveau d'automatisation proposée par Sheridan et Verplanck (1978) peut ainsi s'interpréter comme un passage progressif de l'autorité totale à l'opérateur vers l'autorité totale à la machine. L'humain est progressivement écarté du contrôle de la situation et perd au final toute autorité sur le processus contrôlé.

Il s'agira toutefois de ne pas confondre ce qui relève de l'autorité attribuée à la machine par l'opérateur, c'est-à-dire de l'attitude que ce dernier a envers la machine, de l'autorité qui est associée à la machine par le concepteur, ou le législateur. Par exemple, un conducteur peut avoir une attitude associant un degré d'autorité différent de l'autorité que le concepteur de la machine, ou le législateur, lui a associée. Ce décalage pouvant alors être à l'origine de dysfonctionnement dans la coopération homme-machine.

La catégorisation opérée par Hoc et Chauvin (2011) ne décrit pas explicitement la répartition de l'autorité. Or, cette question de l'autorité pose question du fait que l'accroissement du degré d'automatisation n'est pas systématiquement lié à l'augmentation du degré d'autorité alloué à la machine par le concepteur. Nous allons discuter de la difficulté à catégoriser les assistances en fonction du degré d'autorité en illustrant notre propos avec des exemples de modes de coopération homme-machine.

Par exemple, dans le mode limite, si la limitation s'apparente à un guidage, c'est-à-dire que le conducteur garde la maîtrise totale et peut ne pas tenir compte de cette limite, alors l'autorité est allouée à l'être humain. A l'inverse, si la limitation est infranchissable, que le conducteur ne peut dépasser une limite fixée par le concepteur, alors l'autorité est dévolue à la machine et le conducteur ne peut que se soumettre à cette limitation. Son activité doit s'adapter en fonction de cette limitation. La question de l'autorité pourrait donc distinguer deux types de situation de coopération ayant pourtant un même niveau d'automatisation.

Autre exemple, alors que dans le mode délégation de fonction (niveau d'automatisation élevé), le conducteur est vu comme le superviseur du système homme-machine, ce qui signifie que l'autorité est intégralement du côté humain de ce système, à l'inverse dans le mode de contrôle partagé (niveau d'automatisation plus faible), la répartition de l'autorité est plus ambiguë. Par exemple, si l'intervention de l'automate est désactivable, alors l'assistance s'apparente à une délégation de fonction partielle. Par contre, si elle n'est pas désactivable, la machine acquiert une autonomie dans l'action qui pose cette question de l'autorité et de la capacité d'influencer l'activité de l'autre agent. Le mode correctif est décrit comme correspondant à une intervention lors des situations d'urgence de la machine afin, par exemple, d'éviter une sortie de voie. Cette description pourrait alors s'apparenter à un mode complètement automatisé avec autorité à la machine lorsque la situation est jugée trop critique, plutôt qu'à un mode de contrôle partagé.

Cette discussion illustre la difficulté de classer les assistances, chaque catégorisation ayant ses propres limites. Il s'agit donc d'utiliser ces classifications en ayant bien conscience du critère utilisé pour classer. Selon ce critère les regroupements effectués peuvent en effet être différents. Ensuite, l'évolution technologique rend parfois difficile la distinction entre des dispositifs très proches les uns des autres dans leur mode de fonctionnement. Enfin, selon la discipline, la catégorisation n'est pas forcément la même. Deux dispositifs peuvent dépendre du même algorithme mais produire des effets très différents sur le conducteur en fonction du réglage qui est effectué. Dans une approche centrée sur la machine, ces assistances peuvent être considérées comme étant similaires. Par contre dans une approche centrée sur l'humain, ces assistances peuvent être considérées comme étant très différentes. Les modes de coopération proposés par Hoc et al. 2009 puis revus par Hoc et Chauvin (2011) s'apparente donc à des propriétés coopératives, mais pas à une classification stricto-sensu des dispositifs existants, qui peuvent inclure plusieurs propriétés. Un dispositif n'est donc pas

nécessairement limité à un seul mode de coopération. Ces modes sont une façon de spécifier le type de coopération entre l'homme et la machine. Enfin, l'association d'un dispositif à un mode particulier précise le type de coopération dominant dans l'interaction entre l'homme et la machine.

De plus, nous pensons que cette catégorisation aurait sans doute intérêt à intégrer la question de degré d'autorité afin de préciser les modes de coopération homme-machine. Un degré d'automatisation donné n'a, en effet, pas les mêmes conséquences dans la coopération selon le degré d'autorité alloué à la machine (que ce soit par l'opérateur ou le concepteur).

Dans cette idée d'intégrer la question de l'autorité dans la catégorisation des assistances, Young, Stanton et Harris (2007) se positionnent en situant la limite entre deux catégories d'assistance en fonction de l'agent ayant l'autorité. Les auteurs précisent que selon le type de fonction à automatiser, l'autorité doit être affectée à tel ou tel agent. Lorsque la fonction est liée à la dynamique du véhicule (ABS par exemple) la machine doit avoir l'autorité, et cette autorité se traduit pour les conducteurs par une modification de la dynamique du véhicule. Ce n'est plus quelque chose qu'ils contrôlent directement. D'une certaine façon la machine médiatise l'action du conducteur. A l'inverse, quand la fonction est liée à la conduite, le conducteur doit garder l'autorité et l'automate vient donc en assistance de la conduite. Les auteurs parlent alors de *hard automation (vehicle automation)* pour parler de l'autorité dévolue à la machine et de *soft automation (driving automation)* pour parler de l'autorité dévolue à l'être humain.

3.4.2 La problématique de la responsabilité

Discuter de degré d'autorité attribué à la machine provoque un glissement très rapide vers la question de la responsabilité. La réponse la plus simple consisterait à dire que l'être humain conserve la responsabilité du système homme-machine dans tous les cas, mais la question revient alors de savoir de quel être humain nous parlons. S'agit-il de l'opérateur (du conducteur) ou du concepteur ? Bien que cette question de la responsabilité ne soit pas notre objet d'étude, nous souhaitons tout de même attirer l'attention sur le fait que concevoir des machines qui gagnent en autonomie et en autorité allait mener vers des questions plus sociétales en termes de responsabilité. Nous laissons alors la parole à Muir, qui, dès 1988, avait évoqué cette relation complexe entre autonomie, autorité et responsabilité.

“The issue of machine responsibility will become more important in human-machine relationships to the extent that we choose to delegate autonomy and authority to “intelligent”, but prosthetic, machines. The more power they are given, the greater will be the need for them to effectively communicate the intent of their actions, so that the people who use them can have an appropriate expectation of their responsibility and interact with them effectively.”

3.5 Les assistances étudiées dans le cadre de cette étude

Si les premières générations d'assistances sont plutôt intervenues de façon symbolique dans des tâches à dominance symbolique, une intervention subsymbolique peut être envisagée dans les tâches à dominance subsymbolique. Cela permet de provoquer une intervention de l'automate au même niveau, en termes de processus, que celui dans lequel s'opère le contrôle de l'activité. Par exemple, les assistances classiques de type avertissement agissent dans des processus de haut niveau (symbolique) alors que la tâche de guidage du véhicule requiert plutôt un contrôle de bas niveau (subsymbolique). L'idée est donc d'assister le conducteur au même niveau de processus que celui dans lequel s'opère le contrôle de l'activité.

Afin d'étudier les processus de contrôle (symbolique et subsymbolique) lors de l'intervention subsymbolique d'une assistance dans une activité à dominante subsymbolique, nous avons sélectionné deux dispositifs d'aide à la conduite. Ces deux dispositifs ont été sélectionnés du fait de leur proximité dans leur mode d'intervention. Ces deux assistances agissent directement sur le volant et génèrent donc des informations haptiques pour le conducteur. Par contre, ils s'opposent dans la temporalité de leur intervention, et donc dans les effets propres qu'ils ont sur la trajectoire.

Le premier dispositif est appelé amorçage moteur (*motor priming*) et produit une intervention ponctuelle sur le volant. La terminologie d'*amorçage moteur* est reprise des études antérieures de Navarro (2009), toutefois nous emploierons parfois le terme d'*amorçage haptique*, plus explicite il nous semble sur les effets que produit le dispositif. Cette intervention est d'une durée d'une seconde lorsque la situation est jugée critique par l'automate. Le second dispositif décrit plutôt un mode de coopération, qui correspond à un contrôle partagé continu du contrôle de la trajectoire (*shared control*). L'intervention du dispositif est donc permanente, tout du moins tant qu'il est actif.

3.5.1 Intervention ponctuelle : l'amorçage moteur

3.5.1.1 Description technique de l'amorçage moteur

D'un point de vue technique, l'assistance d'amorçage moteur (AM) se déclenche lorsque le véhicule se trouve être proche d'une sortie de voie (écart de 80 cm par rapport au centre de la voie par exemple). Un couple de force appliquée sur la colonne de direction entraîne alors une oscillation asymétrique du volant durant une seconde. Cette assistance n'est pas qu'une simple vibration du fait de cette oscillation asymétrique. Autrement dit, le couple de force qui engendre un mouvement du volant vers le centre de la voie est plus fort que celui qui entraîne un mouvement du volant de l'autre côté.

En l'absence totale de force exercée par le conducteur sur le volant, le caractère asymétrique du signal de commande transmis à la colonne de direction entraînerait une légère déviation de la trajectoire du véhicule en direction du centre de la voie. Néanmoins, comme ce dispositif ne prend pas en compte la résistance offerte par les conducteurs, systématique dès lors que les mains sont posées sur le volant, il ne contrôle pas les effets qu'il produit au niveau du volant et délivre toujours les mêmes couples de force. En situation de conduite, les oscillations effectives du volant sont donc amorties par les forces appliquées sur le volant (poids des mains et forces exercées pour mener à bien l'activité de guidage), ce qui réduit d'autant plus l'influence directe sur la trajectoire.

L'assistance AM peut être catégorisée comme faisant partie du mode de contrôle mutuel. Dans ce mode les automates sont en effet conçus pour interpréter les informations en termes de limite à respecter en relation avec un certain niveau de risque. Ils sont alors à même de renvoyer des feed-backs critiques aux opérateurs sur leurs actions (contrôle mutuel) lors du franchissement de ces limites, l'assistance AM étant elle-même une déclinaison du sous-mode suggestion d'action (du mode contrôle mutuel) dans lequel l'automate renvoie non seulement un feed-back, mais suggère la correction à opérer.

L'assistance AM délivre donc un avertissement au conducteur mais intervient également au niveau de l'initialisation de l'action, par l'amorçage du geste de correction. Le système est donc conçu pour suggérer la correction, mais également pour initialiser l'action à effectuer. Nous parlerons alors d'amorçage haptique. Cette assistance est alors plus qu'un simple avertissement, sans toutefois agir directement sur la direction. Autrement dit, ce dispositif s'apparente à une critique du comportement du conducteur ainsi qu'à une action indirecte sur

la trajectoire, via l'effecteur de la réponse. Diverses questions en lien avec le contrôle se posent alors. Il est notamment important de connaître l'efficacité de ce dispositif et de comprendre comment l'AM s'intègre dans le contrôle cognitif du conducteur.

La suggestion d'action s'effectuant sous la forme d'un amorçage moteur dans le cadre de l'assistance AM, la question de la gestion des effets des interférences devient alors cruciale. Les effets de ces interférences peuvent en effet être positifs (réduction des délais de correction de la trajectoire par rapport à une conduite sans assistance) mais également négatifs (augmentation de ces délais en cas de diagnostic différent sur la réponse à apporter par exemple). En d'autres termes nous nous intéressons à l'efficacité de cette technologie, mais également à ses effets potentiellement néfastes sur la conduite.

La figure 7 schématise le fonctionnement du système homme-machine à partir du modèle de Parasuraman et al. (2000). L'automate agit sur le processus de décision en suggérant une direction, mais agit également sur le contrôle moteur en amorçant le geste de correction de la trajectoire.

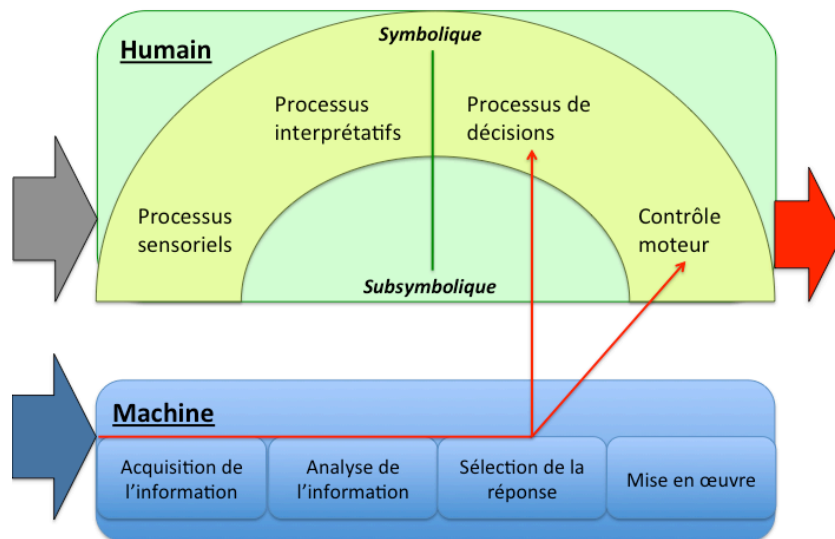


Figure. 7. Schématisation du fonctionnement du système homme-machine lors de la présence de l'amorçage moteur.

3.5.1.2 Type de réaction provoquée par l'amorçage

Deux questions sont centrales dans le réglage du dispositif d'amorçage, celle du sens de la première oscillation d'une part, mais également celle de la puissance de l'amorçage d'autre part. En effet, ces questions sont d'autant plus importantes que deux philosophies radicalement différentes sous-tendent les choix de ces réglages. Dans la logique initiale, issue des travaux de Suzuki et Jansson (2003), Navarro et al. (2007) et Navarro (2009), le sens de l'amorce (de l'oscillation asymétrique) coïncide avec la direction de la correction suggérée. De ce fait, la force du signal est réglée de telle sorte qu'elle provoque une initialisation (ou amorce) de ce geste.

Une autre logique consiste à émettre un puissant signal dans le sens contraire de la correction afin de provoquer un comportement supposé réflexe de contre-réaction (Kullack, Ehrenpfordt, Lemmer, & Eggert, 2008). Ces deux approches se démarquent tout d'abord du point de vue du comportement attendu de la part du conducteur (initialisation de la correction contre réflexe compensatoire), mais également par la façon dont elles envisagent de laisser le

contrôle au conducteur. En effet, dans la première approche, l'inhibition de l'amorçage doit rester possible, alors que dans la seconde elle doit être non contrôlable par définition. De plus, si les philosophies de base divergent, les résultats contradictoires obtenus par Suzuki et Jansson posent également la question de la possibilité de contrôler l'effet du signal d'AM devant initier la correction. Notons que, lorsque nous parlons de l'assistance d'« AM » dans la suite de cette étude, nous nous référons à la philosophie originelle qui consiste à initier la correction par une amorce dans le sens du geste de correction.

Les différences constatées entre ces études, dans leurs philosophies mais également dans leurs résultats, nous renvoient donc à la question initiale, qui est celle du contrôle, cette question devant être analysée à notre sens sous l'angle de la puissance de l'amorçage de l'assistance. Nous pouvons en effet nous demander si cette puissance de l'amorçage de l'assistance d'AM est le facteur qui permet de distinguer les comportements réflexes des comportements volontaires lors de l'activation de ce genre d'assistance.

Enfin, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, deux indicateurs permettent de distinguer le comportement réflexe, du comportement volontaire. Le premier indicateur est la capacité d'inhiber le mouvement et le second indicateur est la capacité de moduler le mouvement.

3.5.2 Intervention continue : le contrôle partagé

3.5.2.1 Description technique du contrôle partagé

Le second dispositif étudié correspond à une situation de contrôle partagé (Griffiths & Gillespie, 2005). Le dispositif de contrôle partagé (CP), développé à l'IRCCyN, partage de façon continue la fonction maintien dans la voie entre un automate et un conducteur. Dans les modes de coopération de Hoc et Chauvin (2011), cela correspond au contrôle partagé continu. Dans le cadre du CP, le dispositif permet à l'homme et à la machine d'exercer simultanément une force sur l'interface de contrôle, c'est-à-dire un couple sur le volant. La trajectoire est le résultat du couple exercé par le système homme-machine. La figure 8 illustre cette description.

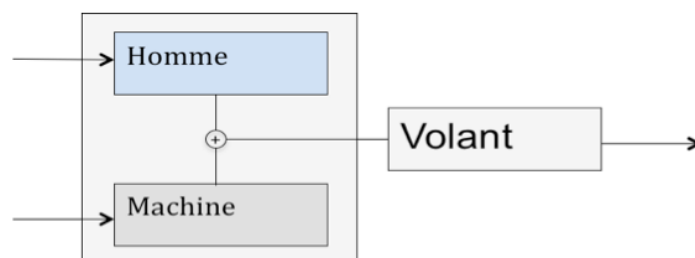


Figure. 8. Illustration du contrôle partagé.

L'automate calcule en continu le couple optimal à appliquer sur le volant pour maintenir le véhicule au centre de la voie (Saleh, Chevrel & Lafay, 2010). Ce calcul prend en compte plusieurs critères, tels que la position dans la voie, l'angle de cap et le couple au volant. Ensuite, seul un pourcentage de ce couple optimal est réellement appliqué sur le volant afin de ne pas produire une automatisation totale de la conduite.

L'automate produit donc, en continu, une action sur la trajectoire (la variable contrôlée), sans toutefois être capable de conserver le véhicule dans la voie en toutes circonstances. Une vitesse trop élevée ou une courbure très importante ne permettront pas à l'automate de suivre le tracé de la voie. Enfin, l'action de l'automate sur la trajectoire étant réalisée à partir du

volant, cela produit également un guidage haptique sur le conducteur. Le conducteur est donc incité à suivre la direction calculée comme étant optimale par l'assistance.

Plusieurs interventions du dispositif peuvent alors être recensées en fonction de l'analyse qu'il fait de la situation (Tableau 2).

Tableau 2 - Intervention du contrôle partagé en fonction de l'analyse de la situation réalisée par l'automate.

Analyse de la situation par l'automate	Action	Sensation du conducteur
Accord total avec le conducteur	Pas d'action	Pas d'assistance
Accord partiel avec le conducteur	Couple complémentaire	Direction plus légère
Désaccord partiel avec le conducteur	Couple opposé, inférieur à celui délivré par le conducteur	Direction plus rigide
Désaccord total avec le conducteur (dans les limites de l'automate)	Couple opposé, supérieur à celui délivré par le conducteur	Le volant tourne dans le sens contraire du couple produit par le conducteur

Du fait de la dynamique de la situation et de l'action continue du dispositif, ces situations d'usages peuvent changer rapidement. Ces quatre cas de figure peuvent donc se retrouver successivement sur une échéance assez brève. Cette décomposition a donc comme objectif de simplement préciser les différentes possibilités à un instant t , mais la dynamique de la situation fait que l'intervention de l'automate est variable en fonction de la dynamique de la situation.

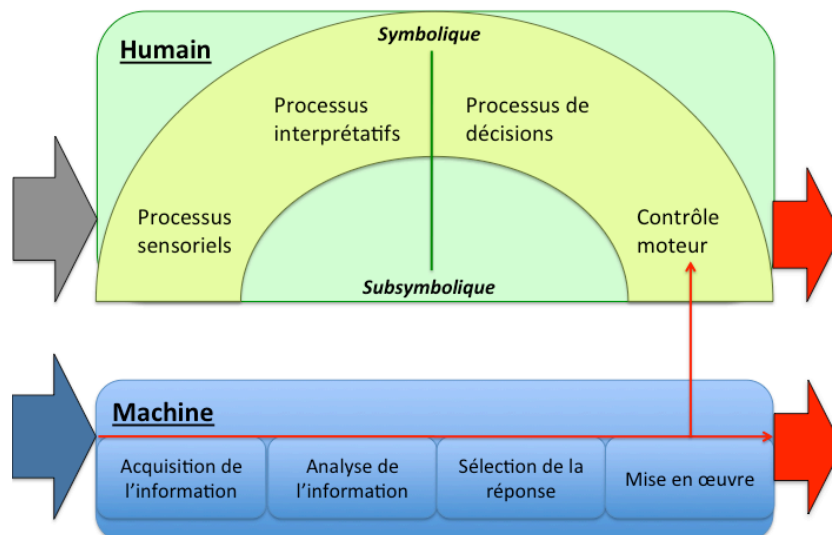


Figure. 9. Schématisation du fonctionnement du système homme-machine en situation de contrôle partagé

L'objectif du CP est donc de lisser la trajectoire en maintenant le conducteur dans la boucle de contrôle. L'idée générale est d'alléger la tâche de conduite en participant continuellement au contrôle de la trajectoire, sans provoquer d'effets néfastes. L'objectif d'éviter des phénomènes de contentement, c'est-à-dire un désengagement de l'humain de la tâche, est donc primordial dans la conception de ce dispositif.

La figure 9 schématise le fonctionnement du système homme-machine à partir du modèle de Parasuraman et al. (2000). L'automate agit directement sur la trajectoire, mais également sur le contrôle du geste effectué par le conducteur (guidage haptique).

3.5.2.2 Le degré de partage entre l'homme et la machine

Nous avons précédemment décrit le contrôle partagé comme l'application d'un pourcentage de l'intervention calculé comme étant nécessaire. Ce pourcentage est rarement défini dans la littérature (Abbink, Mulder, & Boer, 2011), car très dépendant de la loi de commande utilisée, mais ce pourcentage est pourtant essentiel pour comprendre et interpréter les résultats issus de l'analyse d'une situation de contrôle partagé.

Présenter la situation comme étant du contrôle partagé ne présume pas la façon dont est prévu ce partage par le concepteur, ni la façon dont le partage est réellement réalisé par le conducteur. D'une part, l'automate peut être conçu pour agir plus ou moins sur la trajectoire, d'autre part le conducteur peut très bien coopérer en déléguant la fonction maintien dans la voie, dès lors qu'il évalue l'action du dispositif comme étant suffisante sur la trajectoire. Or, ce type de coopération n'étant pas prévue par le concepteur, cela conduirait à des situations dangereuses, dans lesquelles le dispositif ne serait pas capable de suivre la trajectoire en complète autonomie.

Ainsi, lors de la conception d'une situation de contrôle partagé, il est primordial d'évaluer le juste milieu entre trop d'intervention de l'automate et pas assez d'intervention de cet automate. Enfin, ce travail de conception est également un bon candidat pour étudier la façon dont le contrôle de l'activité se met en œuvre avec différents degrés de contrôle partagé.

3.5.2.3 Les effets à long terme d'un contrôle partagé

Un autre aspect peu étudié des assistances à la conduite revêt un caractère très important dans la situation de contrôle partagé. Cet aspect est celui des effets d'une pratique prolongée d'une assistance à la conduite. L'amorçage moteur est prévu pour des situations d'urgence et n'est donc pas conçu pour être déclenché régulièrement. Par contre, l'intervention continue du contrôle partagé dans l'activité de guidage du véhicule nécessite d'étudier spécifiquement les effets qu'il pourrait avoir sur les mécanismes adaptatifs liés à la pratique de tout instrument. Prenons l'exemple d'une autre assistance. Nous savons qu'il arrive que le régulateur de vitesse soit utilisé comme une commande pour réguler en continu la vitesse. Cette utilisation correspond à un détournement de fonction dans le sens ou plutôt que de la supervision c'est du contrôle direct qui est exercé sur le régulateur. Cela pose alors problème du fait de l'inertie de la réponse dans l'environnement dynamique de la conduite automobile. Ce détournement de l'usage prévu par le concepteur du dispositif peut ensuite poser des difficultés lors des situations d'urgence. Le conducteur peut ne plus être aussi prompt à réagir et donc avoir des difficultés de reprise en main.

Cet aspect d'adaptation de l'activité suite à une pratique prolongée d'un dispositif est intéressant car il permet de comprendre comment s'opère le contrôle de l'activité à des niveaux à la fois stratégiques (planification), mais également plus opérationnels (incidence sur les routines).

3.6 Synthèse des questions de recherche

Pour résumer les deux chapitres expérimentaux, nous avons donc sélectionné deux assistances à la conduite agissant sur le conducteur par le biais d'informations haptiques délivrées au volant. Cette intervention nous permet de générer des informations subsymboliques et d'étudier ainsi la façon dont s'opère le contrôle cognitif de l'activité dans un environnement dynamique de coopération homme-machine. Le tableau 3 synthétise les principales différences entre les deux assistances.

Tableau 3 - Synthèse des assistances étudiées.

	Amorçage moteur	Contrôle partagé
Temporalité d'intervention	Ponctuelle (sur critère de risque)	Continue (tant qu'il est actif)
Cas d'usage	Prévention des sorties de voie	Aide au suivi de voie
Degré d'intervention	Fixe	Variable
Effet au niveau haptique	Amorçage	Guidage
Effet sur la trajectoire	Quasi-nul	Variable

La question centrale de cette thèse est donc de savoir comment s'opère le contrôle de l'activité de guidage du véhicule lorsqu'agit un automate sur la modalité haptique, que ce soit ponctuellement ou continûment.

Afin de répondre au moins en partie à cette question, nous avons réalisé quatre expérimentations qui seront détaillées dans quatre chapitres expérimentaux. Les deux premiers chapitres expérimentaux répondront à la question de savoir si le conducteur conserve le contrôle lorsqu'un dispositif intervient **ponctuellement par la modalité haptique en fournissant des informations subsymboliques** sur la tâche de guidage du véhicule. Ce contrôle sera caractérisé en fonction de la capacité des conducteurs à inhiber et/ou à moduler les effets du dispositif d'amorçage moteur sur leurs manœuvres de corrections.

Le chapitre 5 répondra à la question de savoir si la supervision (symbolique) de l'activité permet **d'inhiber** l'effet ponctuel au niveau subsymbolique du dispositif d'amorçage moteur.

Le chapitre 6 répondra à la question de savoir si la supervision (symbolique) de l'activité permet de **moduler** l'effet ponctuel au niveau subsymbolique du dispositif d'amorçage moteur.

Les deux derniers chapitres expérimentaux répondront à la question de savoir si le conducteur conserve le contrôle lorsqu'un dispositif intervient **continûment par la modalité haptique en fournissant des informations subsymboliques** sur la tâche de guidage du véhicule.

Le chapitre 7 répondra à la question de savoir si un **basculement d'un mode coopération de type contrôle partagé vers un mode de coopération de type délégation de fonction** se produit lorsque la machine est conçue pour intervenir beaucoup, ou lorsque l'anticipation de l'évolution de la situation devient plus difficile.

Le chapitre 8 répondra à la question de savoir si une intervention continue dans les boucles sensori-motrices **modifie les mécanismes adaptatifs lors d'une conduite prolongée en**

situation de contrôle partagé de la direction, que ce soit en situation de conduite nominale ou critique.

Avant de présenter ces travaux, nous allons commencer par présenter dans le chapitre suivant (chapitre 4) les questions d'ordre méthodologiques qui doivent être discutées pour justifier les choix réalisés lors de ces expérimentations.

3.7 Références

- Abblink, D., A., Mulder, M., & Boer, E., R. (2011). Haptic shared control: smoothly shifting control authority. *Cognition, Technology & Work*, 14, 19-28.
- Bainbridge, L. (1987). Ironies of automation. In J. Rasmussen, K.D. Duncan, & J. Leplat (Eds.), *New technology and human error* (pp. 271-284). Chichester, UK: Wiley.
- Castelfranchi, C. 1998, Modelling social action for agents. *Artificial Intelligence*, 103, 157-182.
- Coutton-Jean, C., Mestre, D.R., Goulon, C., & Bootsma, R.J. (2009). The role of edge lines in curve driving. *Transportation Research Part F*, 12, 483-493.
- Endsley, M.R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, 37, 32-64.
- Endsley, M., & Kaber, D.B. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, 42, 462-492.
- Fitts, P.M. (1951). *Human engineering for an effective air navigation and traffic control system*. Washington, DC: National Research Council.
- Griffiths, P.G., & Gillespie, R.B. (2005). Sharing control between humans and automation using haptic interface: primary and secondary task performance benefits. *Human Factors* 47, 574-590.
- Hoc, J.M. (2000). From human-machine interaction to human-machine cooperation. *Ergonomics*, 43, 833-843.
- Hoc, J.M (2001). Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamic situations. *International Journal of Human-Computer Studies*, 54, 509-540.
- Hoc, J.M., & Chauvin, C. (2011). Cooperative implications of the allocation of functions to humans and machines. (Manuscript submitted for publication)
- Hoc, J.M., Young, M. S., & Blosseville, J. (2009). Cooperation between drivers and automation: implications for safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10, 135-160.
- Hollnagel, E., & Woods, D.D. (1983). Cognitive systems engineering: new wine in new bottles, *International Journal of Man-Machine Studies*, 18, 583-600.
- Hollnagel, E., & Woods, D.D. (2005). *Joint cognitive systems: patterns in cognitive systems engineering*. CRC Press, Boca Rotan.
- Jamet, E., Gavota, M., & Quaireau, C. (2008). Attention guiding in multimedia learning. *Learning and instruction*, 18, 135-145.
- Kullack, A., Ehrenpfordt, I., Lemmer, K., & Eggert, F. (2008). ReflektAS: lane departure prevention system based on behavioural control. *Intelligent Transport Systems*, 2, 285-293.

- Lee, J. (2006). Human Factors and Ergonomics in Automation Design. In G. Salvendy (Ed.), *Handbook of Human Factors and Ergonomics* (3rd Ed.) (pp. 1570-1590), New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.
- Mars, F. (2008). Steering and gaze control modifications from directed or spontaneous use of a visual augmentation cue. In *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings* (pp. 1541-1545). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Mars F., Saleh L., Chevrel P., Claveau F. & Lafay J.F. (2011). Modelling the visual and motor control of steering with an eye to shared-control automation. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 55th Annual Meeting – 2011* (pp. 1422-1426). ISBN: 978-0-945289-39-5
- Michon, J.A. (1985). A critical view of driver behavior models. What do we know, what should we do? In L. Evans & R. Schwing (Eds.), *Human behavior and traffic safety* (pp. 485-525). Plenum press, New York.
- Millot, P. & Lemoine, M.P. (1998). An attempt for generic concepts toward human-machine cooperation. *IEEE SMC*, San Diego, CA, October.
- Muir, B.M. (1988). Trust between humans and machines, and the design of decision aids, in E. Hollnagel, G. Mancini and D. D. Woods (eds), *Cognitive Engineering in Complex Dynamic Worlds* (pp. 71-84). London : Academic Press
- Navarro, J. (2009). *Coopération homme-machine en conduite automobile assistée : Contrôle cognitif et contrôle de la trajectoire*. Thèse, Université de Nantes, France. Retrouvé de <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00365077/>.
- Navarro, J., Mars, F., & Hoc, J. M. (2007). Lateral Control Assistance for Car Drivers: A Comparison of Motor Priming and Warning Systems. *Human Factors*, 49, 950-960.
- Parasuraman, R., Sheridan, T., & Wickens, C. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 30, 286-297.
- Picard, R.W., Vyzas, E. & Healey, J. (2001). Toward machine emotional intelligence: analysis of affective physiological state. *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 23, 1175–1191.
- Saleh L., Chevrel P., Mars F., Lafay J.F., & Claveau F. (2011). Human-like cybernetic model for lane keeping. In S. Bittanti, A. Cenedese, S. Zampieri (Eds.), *Proceedings of the 18th IFAC World Congress*, (pp. 4368-4373). ISBN: 978-3-902661-93-7
- Sheridan, T. B., & Verplanck, W. L. (1978). *Human and computer control of undersea teleoperators*. Cambridge, MA: MIT, Man Machine Systems Laboratory.
- Sheridan, T. B. (1992). *Telerobotics, automation, and human supervisory control*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Stanton, N.A., & Young, M.S. (1998). Vehicle Automation and Driving Performance, *Ergonomics*, 41, 1014–1028.
- Suzuki, K., & Jansson, H. (2003). An analysis of driver's steering behaviour during auditory or haptic warnings for the designing of lane departure warning system. *Japan Society of Automotive Engineers Review*, 24, 65-70.

- Tricot, A., & Amadiou, F. (2011). Navigation dans les hypertextes. In J. Dinot, & J.M.C. Bastien, (Eds.), *L'ergonomie au service de la vie quotidienne*. (pp. 167-192). Paris : Hermès.
- Young, M.S., Stanton, N.A. & Harris, D. (2007). Driving automation: learning from aviation about design philosophies, *International Journal of Vehicle Design*, 45, 323–338.
- Wiener (1981): A psychological state characterized by a low index of suspicion. (p. 117). [Wiener, E.L. (1981). Complacency: Is the term useful for air safety? In Proceedings of the 26th Corporate Aviation Safety Seminar (pp. 116-125). Denver: Flight Safety Foundation, Inc.].
- Wiener, E., Kanki, B., & Helmreich, R. (Eds.). (1993). *Cockpit Resource Management*. New York: Academic Press.

Chapitre 4 - Les méthodes de recherche utilisées

« L'important, c'est de savoir ce qu'il faut observer. »

Histoires extraordinaires, 1856, **Edgar Allan Poe**

SOMMAIRE

- 4.1 Les choix méthodologiques
 - 4.2 La construction du matériel de recherche
 - 4.3 Les types d'observations réalisées
 - 4.4 Références
-

4.1 Les choix méthodologiques

En s'intégrant dans le cadre conceptuel de la coopération homme-machine, l'objectif principal de cette thèse est de mettre en évidence la façon dont le contrôle cognitif de l'activité permet de réguler les effets d'une intervention par la modalité haptique d'assistances à la conduite (i) quand cette intervention est ponctuelle ou (ii) lorsque cette intervention est continue.

Toute recherche nécessite de faire des choix méthodologiques. Ces choix doivent être faits consciemment car ils vont éclairer les résultats qui seront produits. Ils permettront alors de les interpréter et d'en discuter les conclusions.

Nous avons fait des choix en fonction de nos objectifs de recherche d'une part, et des réalités matérielles du terrain d'autre part. Nous allons donc présenter les grandes questions méthodologiques auxquelles nous avons été confronté dans l'élaboration de ce projet de recherche. Nous commencerons cette présentation par le choix du matériel sur lequel les conducteurs ont été amenés à coopérer avec les deux dispositifs d'aide à la conduite que nous avons sélectionnés. Puis, nous discuterons du type d'observation que nous avons réalisé ainsi que des méthodes statistiques que nous avons utilisé.

4.2 Conduite réelle ou simulation de conduite ?

Les recherches que nous souhaitions mener pouvaient théoriquement être réalisées sur piste d'essai ou sur simulateur de conduite. En synthétisant les choses, nous avons trois besoins qu'il nous fallait combler dans le choix d'une étude sur piste ou sur simulateur.

Le premier besoin était **d'adopter une approche expérimentale**. Nous voulions en effet pouvoir manipuler différents facteurs afin d'étudier précisément le contrôle de l'activité en situation de coopération homme-machine au niveau haptique. Ce besoin nécessitait d'avoir accès à un contrôle expérimental fort afin de réduire au maximum le poids d'éventuelles variables parasites.

Le second besoin était de devoir **travailler dans des situations à risque fort**. L'étude du mode amorçage moteur nécessitait en effet de pouvoir provoquer des quasi-sorties de voie. Ces situations devaient être suffisamment « risquées » pour justifier l'intervention du dispositif, mais la déontologie nécessitait un respect total de la sécurité pour les conducteurs que nous souhaitions observer.

Le dernier besoin était de devoir **transférer rapidement sur un véhicule des technologies** qui n'étaient pas encore développées en début de thèse. Le contrôle partagé continu fut, en effet, le résultat d'une thèse menée en Automatique qui fut réalisée parallèlement à nos travaux (Saleh, 2012).

La route réelle pouvait difficilement être envisagée pour des raisons de sécurité. De plus, le transfert des assistances à la conduite sur véhicule réel aurait nécessité des délais qui n'étaient pas raisonnables dans la durée de la thèse. Nous avons donc choisi une approche expérimentale sur simulateur de conduite afin de pouvoir confronter les conducteurs à ces assistances et afin de pouvoir manipuler les situations de conduite.

Les simulateurs de conduite les plus onéreux sont à base mobile. Ils permettent ainsi de rendre disponibles les informations vestibulaires de type accélération latérale. La figure 10 illustre par exemple l'un des simulateurs mobiles les plus perfectionnés d'Europe actuellement, celui de l'université de Leeds au Royaume-Uni.



Figure. 10. Photo du simulateur à base mobile de l'Université de Leeds (Royaume-Uni).

Il est généralement admis que les expérimentations menées sur simulateur à base mobile sont plus écologiques que celles menées sur simulateur à base fixe, c'est-à-dire qu'elles correspondent davantage à la réalité. Toutefois, pour nos besoins, un simulateur à base fixe semblait largement suffisant, du moment que les retours haptiques sur le volant restituaient

convenablement les sensations produites en conduite réelle. Ce point était particulièrement important puisque nous souhaitions étudier les interférences entre conducteur et automate dans le contrôle de la direction.



Figure. 11. Photo du simulateur à base fixe de l'IRCCyN.

Nous avons donc utilisé le simulateur OKTAL de l'IRCCyN (figure 11). Ce simulateur est équipé d'un volant à retour d'effort réaliste. Le logiciel SCANNeRII®¹ est utilisé avec un modèle dynamique de véhicule (Lechner et al., 1997). Ce modèle permet de reproduire avec un haut degré de réalisme la dynamique des véhicules de la cabine ainsi que du trafic. L'environnement visuel est rendu sur trois moniteurs LCD de 32 pouces. Le premier est positionné en face du conducteur et les deux autres sont positionnés sur les côtés, à un angle de 45° par rapport à l'écran central. Les conducteurs que nous avons recrutés étaient installés à environ 1 mètre de l'écran central et la scène visuelle couvrait 115° d'angle visuel en largeur et 25° en hauteur.

Dans ce simulateur, la scène visuelle est reproduite de façon relativement réaliste. La figure 12 présente une capture d'écran du type d'environnement dans lequel les conducteurs ont été amenés à évoluer.

Les assistances que nous avons étudiées sont destinées à des environnements ruraux. C'est donc essentiellement ce type d'environnement qui a été utilisé dans la création des itinéraires de conduite. Chaque itinéraire emprunté sera décrit en détail dans chacun des chapitres expérimentaux.

¹ <http://www.scanersimulation.com/>



Figure. 12. Illustration du rendu de la scène visuelle sur l'écran central.

4.3 Les types d'observations réalisées

4.3.1 Les critères d'analyse sélectionnés

En ergonomie, plusieurs critères sont pris en compte dans l'analyse d'une activité suite à l'introduction d'un nouveau dispositif. Les principaux critères généralement retenus sont ceux d'utilité / d'efficacité, d'utilisabilité / d'efficience, et enfin des critères plus affectifs tels que la satisfaction.

Notre objet d'étude est celui du contrôle de l'activité. Nous allons donc centrer nos analyses sur l'usage, en termes d'efficacité et d'efficience des dispositifs.

Etudier **l'efficacité du dispositif** signifie étudier l'adéquation entre la fonction du dispositif et les buts de l'opérateur. Dans le cadre de l'analyse du système homme-machine, cela revient à étudier les effets de l'introduction d'un dispositif sur la performance de conduite, cette performance de conduite pouvant alors être déclinée en deux niveaux :

- *La performance en situation nominale*, qui correspond dans notre contexte à la trajectoire réalisée dans un contexte nominal de conduite, sans risque particulier. Cette situation doit être étudiée lorsque le dispositif modifie sensiblement l'activité, ce qui est le cas du contrôle partagé continu. Les conducteurs ont en effet une intervention en continu de l'automate qui vient modifier la trajectoire ainsi qu'un guidage haptique afin de lisser leur trajectoire. C'est donc la performance du système homme-machine dans son ensemble qui sera considérée en comparaison d'un conducteur seul confronté à la même activité.
- *La performance en situation critique* correspondant quant à elle à une situation d'urgence dans laquelle le système homme-machine doit répondre rapidement et efficacement afin d'éviter l'accident. Le mode amorçage moteur sera par exemple étudié spécifiquement dans ces situations. Il s'agira alors d'étudier la rapidité de réponse ainsi que le réglage du geste de correction. Encore une fois, ce sera la performance du système homme-machine qui sera comparée avec la performance d'un conducteur seul confronté à la même situation critique.

Etudier **l'efficacité** du dispositif revient à étudier son coût d'utilisation. Si l'assistance est utile, et contribue par exemple à améliorer les trajectoires en situation nominale et/ou critique, cela ne doit pas se faire à un coût trop important pour le conducteur. L'efficacité sera particulièrement étudiée dans le contexte du contrôle partagé continu, du fait de cette continuité dans le mode d'intervention.

D'autres critères plus subjectifs, telles que la confiance, l'acceptabilité ou la satisfaction sont très importants dans l'étude de ces assistances. Toutefois, notre objet d'étude étant principalement celui du contrôle de l'activité, nous allons centrer nos analyses sur l'usage. Les aspects affectifs viendront parfois étayer nos analyses mais ne seront pas au centre de nos recherches.

4.3.2 Les données recueillies

4.3.2.1 Un centrage sur les activités subsymboliques

Les travaux dont il va être question par la suite visent à analyser des activités cognitives à prédominance subsymbolique. Nous avons vu que la tâche de guidage du véhicule est une activité hautement automatisée, faisant intervenir des routines dans le contrôle de l'activité.

Les assistances étudiées agissent aussi principalement au niveau subsymbolique. Par exemple, il ressort des recherches menées par Navarro (2008) que les conducteurs éprouvent des difficultés à formuler verbalement leurs activités de conduite. L'auteur précise que très peu de verbalisations spontanées relatives à la coopération homme-machine ont été enregistrées. Ces difficultés renvoient à la nature subsymbolique de l'activité de guidage du véhicule. Les activités perceptivo-motrices sont des activités fortement automatisées qui apparaissent plus difficiles à commenter verbalement que d'autres activités (telles que la prise de décision ou la résolution de problèmes).

Du fait que dans cette thèse nous nous intéressions à la coopération homme-machine lors de la tâche de guidage du véhicule, il nous a semblé plus adéquat de nous centrer sur des variables observées d'action sur les commandes ou de résultat en termes de génération de trajectoire. Quelques données recueillies par auto-évaluation compléteront les analyses mais ne formeront pas le cœur de ce travail.

4.3.2.2 Le choix des variables

Le choix des variables et la construction du matériel expérimental se sont fait en deux phases distinctes.

Une première phase correspondait à la construction des deux premières expérimentations sur le mode d'amorçage moteur. Le travail sur ce mode est un travail de précision du fonctionnement de mécanismes et d'hypothèses préalablement avancées par Navarro et al. (2007, 2010). L'objectif est d'aller étudier l'articulation entre les niveaux symboliques et subsymboliques de l'activité. Pour la construction du matériel ainsi que le choix des variables, nous avons choisi de répliquer le travail de Navarro (2007) en y intégrant notre propre contribution, c'est-à-dire une réflexion ainsi qu'une opérationnalisation de facteurs permettant d'étudier le contrôle cognitif lors du déclenchement de l'amorçage moteur.

Une seconde phase correspondait à l'étude du contrôle partagé. Peu de publications, et donc d'expérimentations, sont recensées à propos de ce mode de contrôle. La première étude sur un mode de contrôle partagé de la direction dans le contexte de la conduite est attribuée à Griffiths et Gillespie (2005). Dans cette étude, le contrôle partagé était réalisé dans un contexte très peu écologique. La commande se faisait par exemple à partir d'un boîtier constitué d'une roue motorisée, en remplacement d'un véritable volant. Nous avons donc

employé une approche plus exploratoire qui consistait à concevoir entièrement notre propre matériel de recherche. Nous nous sommes inspirés des travaux de Griffiths et Gillespie tout en essayant de conserver une certaine cohérence par rapport à nos précédents travaux ainsi qu'avec notre objet d'étude.

4.3.3 Les méthodes statistiques utilisées

Enfin, pour conclure ce chapitre méthodologique, nous voudrions discuter du choix des méthodes statistiques. Classiquement en Psychologie, seuls les tests de signification sont utilisés. Toutefois, l'approche expérimentale sur simulateur de conduite nous a amené à travailler sur des échantillons de taille relativement réduite. Afin de nous prévenir contre le piège consistant à lier absence d'effet et absence de significativité, nous avons choisi de recourir à l'approche fiducio-bayésienne dans nos analyses.

Les effets des facteurs ont ainsi été analysés pour toutes les variables à l'aide de l'ANOVA. Puis, la taille des effets a été évaluée en se basant sur l'inférence fiduciaire. L'inférence fiduciaire (Hoc, 1983, Rouanet & Lecoutre 1983, Rouanet 1996, Lecoutre & Poitevineau 2005) est une variante de l'inférence statistique bayésienne qui consiste à conclure sur la taille de l'effet dans la population (δ) sur la base de l'effet observé (d), la taille de l'échantillon et sa variabilité. Selon cette théorie, l'intervalle de confiance peut être réinterprété en termes fiduciaire.

L'inférence fiduciaire va donc au delà du test de signification qui conclut uniquement sur l'existence d'un effet non nul. Dans cette thèse, nous concluons sur la taille de l'effet en utilisant une garantie de .90. Par exemple " $\delta > 20$ " signifie que "la probabilité que δ soit plus grand que 20 est de .90".

4.4 Références

- French, D. J., West, R. J., Elander, J., & Wilding, J. M. (1993). Decision-making style, driving style, and self-reported involvement in road traffic accidents. *Ergonomics*, 36, 627-644.
- Griffiths, P.G., & Gillespie, R.B. (2005) Sharing control between humans and automation using haptic interface: primary and secondary task performance benefits. *Human Factors* 47, 574-590.
- Hoc, J.M. (1983). *L'analyse planifiée des données en psychologie*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Lechner D., Delanne Y., Schaefer G., & Schmitt V. (1997). *Méthodologie de validation du logiciel de dynamique automobile CALLAS*. SIA 970202. Congrès SIA Lyon, Avril 1997. Reprinted in *Ingénieurs de l'automobile* N°713, May 1997.
- Lecoutre, B. & Poitevineau, J. (2005). Le logiciel "LePAC". *La Revue de Modulad*, 33 (whole volume). Available from: <http://www.univ-rouen.fr/LMRS/Persopage/Lecoutre/PubBL.html> [Accessed 3 January 2012] (English version)
- Navarro, J., Mars, F., & Hoc, J. M. (2007). Lateral control assistance for car drivers: a comparison of motor priming and warning systems. *Human Factors*, 49, 950-960.
- Navarro, J., Mars, F., Forzy, J., El-Jaafari, M., & Hoc, J. (2010). Objective and subjective evaluation of motor priming and warning systems applied to lateral control assistance. *Accident Analysis & Prevention*, 42, 904-912.

- Rouanet, H. (1996). Bayesian methods for assessing importance of effects. *Psychological Bulletin*, 119, 149–158.
- Rouanet, H. & Lecoutre, B. (1983). Specific inference in ANOVA: from significance tests to Bayesian procedures. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 36, 252–268.
- Saleh, L. (2012). *Contrôle partagé d'un véhicule automobile*. Thèse, Ecole Centrale de Nantes, France.

Chapitre 5 - Effets de la force et de la direction de l’amorçage haptique sur les corrections de sortie de voie

« Nous piétinerons éternellement aux frontières de l'inconnu, cherchant à comprendre ce qui restera toujours incompréhensible. Et c'est précisément cela qui fait de nous des hommes. »

Les cavernes d'acier, 1956, **Isaac Asimov**

SOMMAIRE

- 5.1 Résumé étendu en français
 - 5.2 Introduction
 - 5.3 Method
 - 5.4 Results
 - 5.5 Discussion
 - 5.6 Conclusion and ergonomics recommandations
 - 5.7 References
-

5.1 Résumé étendu en français

Cet article est soumis dans une revue internationale à comité de lecture. Un résumé étendu en français est proposé afin d’introduire l’article qui est reproduit dans son intégralité en anglais.

5.1.1 Objectif de l’étude

Bien que cette étude ait été réalisée, chronologiquement, après celle du prochain chapitre, il nous a semblé plus logique d’inverser cet ordre dans le fil conducteur de la thèse. Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à la question du type de réaction produit par l’amorçage

moteur. Nous allons précisément étudier l’effet que la direction et la force de l’amorçage haptique ont sur la réalisation du geste de correction.

5.1.2 Introduction

Les sorties de voie sont l’une des principales causes d’accident de la route (Najm, Smith & Yanagisawa, 2007). Selon les études, le pourcentage d’accident qui leur est attribué varie entre 40 et 70%. Différents systèmes, appelés assistances à la conduite, sont proposés afin de contribuer à leur diminution. Les assistances de type avertissement (sonore par exemple) sont conçues pour aider les conducteurs à situer le véhicule dans sa voie. Elles les aident ainsi à effectuer un diagnostic adapté de la situation. L’assistance « amorçage moteur » (AM) consiste quant à elle à délivrer de rapides oscillations dans le volant, afin de provoquer une correction motrice encore plus rapide, sans corriger la trajectoire elle-même. Ces oscillations sont orientées vers le centre de la voie (amplitude du signal plus forte vers le centre de la voie). L’efficacité de l’AM, par rapport à une conduite non assistée ou même par rapport aux assistances de type avertissement, a déjà été prouvée (Navarro et al. 2007, 2010). Avec ce dispositif les conducteurs sont plus rapides à revenir en situation sécurisée, c’est-à-dire au centre de la voie. L’efficacité de l’AM peut être interprétée dans le cadre du modèle du contrôle cognitif de Hoc et Amalberti (2007). Ce modèle du contrôle cognitif en situation dynamique, inspiré du modèle *Skill-Rule-Knowledge* introduit par Rasmussen (1986), précise notamment la distinction entre deux niveaux de contrôle. Un contrôle symbolique, proche des processus conscients, contrôlés, et un contrôle subsymbolique plus automatique, proche des boucles de contrôles sensori-motrices. Le modèle précise également le rôle de la supervision (symbolique) des routines (subsymboliques), modélisé par Anderson et al. (2004). Dans le cadre de ce modèle, l’efficacité de l’AM serait liée, tout d’abord, à son action au niveau moteur (contrôle subsymbolique). L’intervention du dispositif produit des informations directionnelles, via la modalité haptique. Elle facilite ainsi l’initiation et la réalisation de la manœuvre de correction. Le dispositif produit bien évidemment, parallèlement, une amélioration du diagnostic de la situation (contrôle symbolique), comme les assistances de type avertissement. Cet avertissement vient ainsi compléter l’intervention au niveau des boucles sensori-motrices.

Un premier axe de recherche pose la question du lien entre puissance de l’amorçage délivré par l’AM et son effet. Ainsi, il s’agira tout d’abord de préciser si un amorçage plus puissant produit des effets plus importants au niveau moteur. Il s’agira également d’étudier l’impact de la puissance de cet amorçage sur la contrôlabilité du véhicule. C’est-à-dire la capacité des conducteurs à conserver la maîtrise de leur véhicule.

Un deuxième axe pose la question de l’effet de la direction de l’amorçage. Plusieurs études suggèrent un amorçage dans le sens de la sortie de voie afin de créer une réponse motrice très rapide, de type réflexe (Beruscha, et al., 2010; Kullack et al. 2008).

La question de cette recherche est donc de savoir de quelle façon le signal haptique doit être délivré afin d’avoir le maximum d’efficacité sur les manœuvres de correction. De plus nous vérifierons l’hypothèse d’un mouvement réflexe en étudiant l’incapacité des conducteurs à inhiber une première réaction automatique, si l’hypothèse du réflexe est valide.

5.1.3 Méthode

Cette étude a placé 18 conducteurs dans des situations critiques de sortie de voie, en virage et en ligne droite. Les conducteurs réalisaient plusieurs fois un itinéraire sur route de campagne, à la vitesse de 70 Km/h. Durant cet itinéraire, des situations de sortie de voie involontaire étaient provoquées de façon aléatoire. Ces situations étaient créées à l’aide de la méthode des

occlusions visuelles. Cette méthode consiste à noircir soudainement, et de façon imprévue, les écrans du simulateur. Lors de ces situations, les conducteurs avaient pour tâche de laisser le véhicule poursuivre sa trajectoire, ce qui conduisait tout naturellement à des sorties de voie en virage. En ligne droite, une légère déviation du véhicule, induite à l'insu des conducteurs, conduisait au même résultat. La réapparition de la scène visuelle, lorsque la sortie de voie était imminente, coïncidait avec le déclenchement de l'assistance. La tâche consistait alors à remettre le véhicule au centre de sa voie, tout en conservant une vitesse d'environ 70 Km/h.

Le premier facteur étudié, présent est celui de la force de l'assistance. Tous les conducteurs ont testé 3 conditions de conduite, une phase de conduite sans assistance et deux réglages, plus ou moins puissants, du dispositif AM (Léger et Puissant). L'AM se déclenche au delà d'une certaine limite de sécurité (80 cm du bord de voie) et provoque des oscillations plus amples vers le centre de cette voie. Néanmoins, ces oscillations ne conduisent pas à une modification de la trajectoire sans action du conducteur.

Le deuxième facteur manipulé est celui de la direction de l'amorçage. Dans la moitié des cas, un amorçage en direction de la sortie de voie était délivré par l'AM (AM contralatéral), c'est-à-dire que le dispositif était censé amorcer au niveau subsymbolique une amplification de la sortie de voie, mais que cet amorçage était invalidé par le traitement symbolique de la scène visuelle. L'objectif était alors d'étudier la capacité des conducteurs à inhiber cet amorçage inadapté au contexte et l'impact de cet amorçage sur l'ensemble de la manœuvre de correction. Dans les autres cas l'amorçage était orienté vers le centre de la voie (AM ipsilatéral).

Les résultats ont été analysés à partir de 3 variables. La *durée de sortie de voie* correspond au temps passé par le véhicule au-delà d'une certaine limite par rapport au centre de la voie. Ensuite, le *temps de réaction* correspond au temps entre la fin de l'occlusion visuelle et l'initiation de la manœuvre de correction par le conducteur. Enfin, le *pic d'accélération du volant* correspond à la force de la manœuvre de correction. Ces pics étaient enregistrés pendant les 450 ms suivant l'initiation de la réponse motrice.

La significativité des effets des facteurs a été mesurée à l'aide d'ANOVA. De plus, afin d'évaluer la taille des effets, des analyses fiducio-bayésiennes ont été réalisées. Ces analyses permettent de traduire l'incertitude sur la valeur de l'effet (δ) dans la population parente, en la situant dans des intervalles probabilisés (la garantie choisie est ici .90). Par exemple, l'expression « $\delta > 0.68$ sec » signifie « $\text{Prob}(\delta > 0.68 \text{ sec}) = .90$. (Lecoutre & Poitevineau, 2005; Rouanet, 1996; Rouanet & Lecoutre, 1983).

5.1.4 Résultats

En virage, l'ANOVA révèle une interaction significative entre le facteur assistance et le facteur sens de l'amorçage ($F(2,24)=13,11, p<.0001$). Dans toutes les conditions, la durée de sortie de voie est réduite par rapport aux conditions sans assistances. L'effet de la direction de l'amorçage est négligeable avec un amorçage léger ($|\delta|<0.14$ s) mais notable dans le cas d'un amorçage puissant ($\delta>0.34$ s). L'amorçage ipsilatéral réduit davantage les sorties de voie.

Toujours en virage, pour le temps de réaction, l'ANOVA révèle une interaction significative entre les facteurs assistance et sens de l'amorçage ($F(2,24)=13.91, p<.0001$). Dans toutes les conditions l'AM a réduit les temps de réaction, mais ces temps étaient davantage réduits lorsque l'amorçage était contralatéral.

Enfin pour ce qui est du pic d'accélération du volant, l'ANOVA ne révèle pas d'interaction significative entre les deux facteurs ($F(2,24)=1.38, p<.2702$). L'AM a augmenté les pics d'accélération quelle que soit la direction de l'amorçage.

Quelques différences sont observées en ligne droite. La principale est le fait que l'amorçage contralatéral ne diminue pas significativement les durées de sortie de voie alors même que les temps de réaction sont significativement réduits par rapport à sans assistance et davantage réduits qu'avec un amorçage ipsilatéral ($\delta > 73.8$ s). Cela s'explique certainement par le fait que les pics de rotation du volant sont plus importants avec un amorçage ipsilatéral, que ce soit avec un amorçage léger ($\delta > 12.36$ °/s) ou puissant ($\delta > 18.54$ °/s).

Durant les entretiens post expérimentaux, aucun des conducteurs ne rapporta avoir été conscient de la manipulation du sens de l'amorçage.

5.1.5 Discussion et conclusion

Globalement, l'AM diminue les durées de sortie de voie, quelles que soient les modalités des autres facteurs (direction et force de l'amorçage). Une analyse détaillée des indicateurs étudiés nous permet de distinguer l'effet de ces facteurs sur les manœuvres de corrections.

Tout d'abord les conducteurs n'ont pas seulement inhibé, ils ont contré l'amorçage dans les situations d'AM erroné. Les conducteurs ont été capables de prendre en compte des éléments du contexte pour initier leur manœuvre de correction. Par exemple, il n'y a pas eu de mouvement en deux étapes, du type première réaction réflexe vers la sortie de voie, suivie de correction vers le centre de la voie. Les temps de réactions les plus petits ont été observés lorsque l'AM était orienté vers la sortie de voie (AM contralatéral). Cela suggère que, lorsque les occlusions visuelles prenaient fin, les conducteurs détectaient immédiatement une discordance visuo-haptique entre le flux visuel (renseignant sur la sortie de voie) et la direction du signal haptique (suggérant d'accentuer la sortie de voie). La détection de la discordance s'exerçait sans doute au niveau subsymbolique, ce que semblent confirmer les entretiens post expérimentaux étant donné l'absence de conscience de signaux erronés. Enfin, si les temps de réaction ont été les plus rapides avec l'AM erroné, les durées de sortie de voie ont été plus réduites lorsque le signal était correct. L'efficacité de la réponse globale ne dépend, en effet, pas uniquement de son délai d'initiation.

Cette présente étude nous a donc permis de conclure sur le fait que l'amorçage est plus efficace lorsqu'il est orienté vers le centre de la voie (ipsilatéral) et que les conducteurs intègrent très rapidement, avant même le début de la correction motrice, des informations liées au contexte. Nous concluons donc également sur le fait que l'amorçage haptique ne produit pas de réactions réflexes, dans le sens non inhibables.

Effect of strength and direction of haptic cueing on steering control during near lane departure

Deroo, M., Mars, F., & Hoc, J.M.

Abstract

The present study compared two distinct approaches to designing driving assistance devices. These devices aim to facilitate steering responses by delivering directional pulses on the steering wheel when lane departure is imminent. In one case, the aim is to prime the corrective gesture through a haptic prompt in the direction of the lane centre (motor priming, Navarro et al. 2007). The other approach consists of eliciting a compensatory reflex reaction by means of a jerk of the steering wheel in the opposite direction (ReflektAS, Kullack et al. 2008). Central to this investigation are the safety benefits of the devices and the ability of drivers to remain in full control of their steering responses. The steering behaviour of 18 participants during near lane departure in bends and in straight lines was analysed. The strength and direction of haptic cueing was manipulated. The results show that drivers were able to control the effect of the haptic prompt in all cases. No reflex counteraction was observed, whatever the strength or the direction of the stimulus. The fastest responses were observed when the prompt was directed toward lane departure, especially when cueing was strong. However, these did not necessarily lead to the fastest returns to a safe position in the lane when compared with motor priming toward the lane centre. The latter yielded improved manoeuvre execution as soon as the steering movement was initiated. These results are discussed in relation to the sensorimotor and cognitive processes involved in steering behaviour. Their implications for the design of haptic-based lane departure warning systems are considered.

Keywords: haptics, lane departure warning systems; cognitive control; steering behaviour

5.2 Introduction

Driving a vehicle requires constant monitoring of the trajectory. It is a fairly easy task, but it is continuous, and driving for long periods may lead to errors because of a lack of attention. One of the more serious consequences is lane departure. In 2003, out of 855,000 accidents, about a quarter that led to injury or death in Canada, France, Germany and the Netherlands have been classified as single-vehicle accidents (24%). This rises to more than one third (36%) when accidents in urban environments are excluded from the analysis (UNECE, 2007).

Driving assistance devices are one solution to the problem of lane departure frequency (Hoc, Young and Blosseville, 2009, Navarro, Mars and Young, 2011). For example, lane departure warning systems (LDWS) aim to improve situation diagnosis by indicating to the driver that he is getting too close to the lane border. In order not to overload the visual channel, more and more assistance devices use other sensory channels. In recent years, the haptic channel has gradually gathered interest in the area of transportation research (Onimaru and Kitazaki, 2010). Various studies have shown that this could be an effective channel for conveying information to the driver (Ho, Reed and Spence, 2006). This is the case for the accelerator pedal, which is used to assist speed control (Kuge et al. 2006; de Rosario et al. 2010) or to promote eco-driving (Azzi, Reymond, Mérienne and Kemeny, 2011). It also applies to the use of the steering wheel in assisting lateral control (Beruscha, Augsburg and Manstetten, 2011; Navarro, Mars and Hoc, 2007, 2010; Suzuki and Jansson, 2003). Assistance to lateral control can be occasional or continuous (Griffiths and Gillespie, 2004). The present study compared two distinct approaches (haptic priming versus “reflexive behaviour”) to the design of

occasional driving assistance devices aimed at facilitating steering responses in critical situations by means of directional haptic cueing.

5.2.1 Motor priming and cognitive control

The Motor Priming (MP) approach proposed by Navarro et al. (2007, 2010) consists in delivering fast, small and asymmetric oscillations on the steering wheel when a large deviation of lateral position is detected. Signal directionality is given by the asymmetry between a relatively shorter and stronger torque pulse toward the centre of the lane than toward the direction of lane departure. In this way, MP indicates in which direction the steering wheel should be turned, with no direct effect on the vehicle's trajectory. The increased effectiveness of MP compared to other directional warning systems (auditory or steering vibration) has been demonstrated (Navarro et al. 2007, 2010). Drivers were always quicker to return to a safe position with MP. A detailed analysis of various steering indicators revealed that this could be due to an improved execution of the steering wheel corrective movement rather than a decrease in reaction times.

It has been proposed that MP improves corrective manoeuvres because it intervenes at the sensory-motor level, whereas classic warning devices only act on the decision-making process. Indeed, whatever the sensory modality through which it is perceived, any warning information is symbolic; it aims to improve the situation diagnosis. In particular, a LDWS gives information about the position of the car, with a view to faster decision-making and more rapid acting on the steering wheel. MP gives a warning to the driver, but it also acts at the proprioceptive and motor levels by pre-activating the corrective gesture. In order to put this idea in perspective, we can refer to the model developed by Parasuraman, Sheridan and Wickens (2000), which is related to levels of automation (Figure 13). Within this model, MP can be described as follows: it acquires information about the lateral position of the car, analyses this information relative to a safety threshold and selects the appropriate response. Then, it acts on the driver both at the level of motor control (haptic prime) and at the level of decision making (warning).

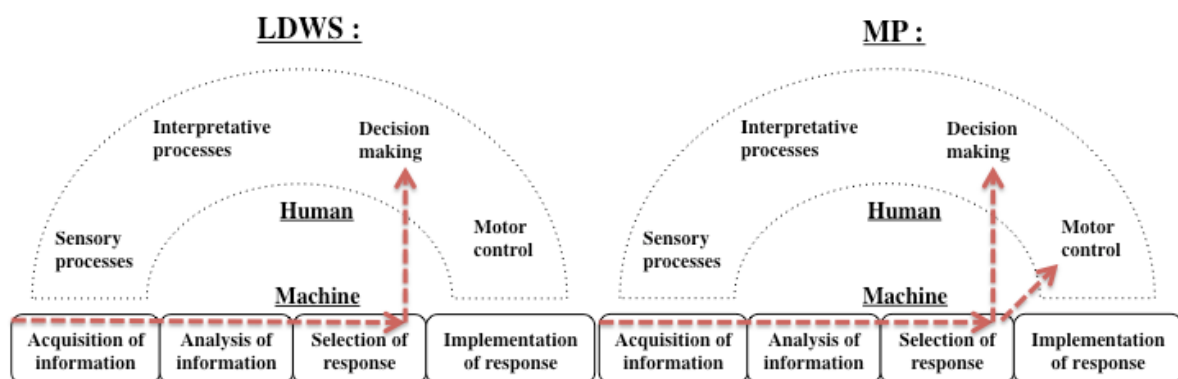


Figure. 13. Illustration of the different degrees of intervention on a driver's cognitive processes with classic LDWS and MP systems.

The effectiveness of MP can be interpreted within the framework of the model of cognitive control in dynamic situations proposed by Hoc and Amalberti (2007). This model is partly based on the Skill-Rule-Knowledge model introduced by Rasmussen (1986). It emphasises the distinction between symbolic control, which involves mainly interpretative processes fed by higher order information, and subsymbolic control, which encompasses perceptual and motor processes fed by sensory signals. This model clarifies the influence of supervisory processes (symbolic) on the execution of routines (subsymbolic), which was introduced by

Anderson et al. (2004). Within this model, MP facilitates the initiation and early execution of the corrective manoeuvre by acting at the sensorimotor level (subsymbolic control). It also warns the driver, which improves the diagnosis of the situation at the level of symbolic control. In turn, supervisory processes can modulate the initiated motor response.

Navarro et al. (2007, 2010) first hypothesized this dual intervention of subsymbolic and symbolic control. This question has been specifically addressed by Deroo, Hoc and Mars (2012), who showed that MP reduced reaction times of corrective gestures during near lane departure. By way of contrast, the level of "risk expectation" manipulated by symbolic information (text messages displayed during visual occlusions) did not influence reaction times. It only influenced the strength of the corrective movements once it was initiated. This suggests that the benefits of MP are due to an early intervention at the sensory motor level (subsymbolic control), which can be modulated by symbolic situation analysis.

5.2.2 Motor priming versus reflexive counteraction

Some results obtained with devices delivering directional pulses on the steering wheel, such as MP, pose the question of whether the driver has the ability to fully control the response elicited by the haptic cue. Indeed, Suzuki and Jansson (2003) observed that when drivers were not informed that they would receive directional pulses on the steering wheel, half the participants followed the direction indicated by the device, while the other half of the participants steered away from it, as if the stimulus was a perturbation that needed to be counteracted. Kullack, Ehrenpfordt, Lemmer, and Eggert (2008) proposed an assistance device called ReflektAS, based on the idea that reflex reactions to steering pulses can be elicited quickly and reliably. They found very fast counteractions to strong haptic pulses that were directed toward the side of lane departure. Hence, although MP and ReflektAS deliver haptic pulses on the steering wheel to improve the driver's response, they are based on two opposing principles: MP delivers mild haptic cues to the arm motor system in order to indicate the direction of the required steering wheel motion, whereas ReflektAS aims to elicit a reflexive counteraction to a strong pulse in the direction of lane departure. These two approaches differ in terms of their expected influence on the driver's behaviour (priming versus counteraction), but also in terms of how much control the driver is supposed to have over the provoked response. Indeed, it should be possible to inhibit the MP response, whereas a reflexive response should, by definition, be uncontrollable. According to Prochazka, Clarac, Loeb, Rothwell and Wolpaw (2000), a movement is considered to be voluntary if it can be modulated or inhibited and a reflex movement if it cannot. So, in terms of ergonomics, the question is to determine whether drivers can modulate or inhibit the effects of a directional pulse on the steering wheel.

5.2.3 Strength and direction of priming

When comparing the steering pulses delivered by MP and ReflektAS, some differences are apparent. On the one hand, MP delivers repetitive pulses of moderate intensity (2 N/m) in the direction of the lane centre (Navarro et al. 2010). On the other hand, Kullack et al. (2008, 2010) tested different strengths of torque pulse up to 7 N/m in the direction of lane departure. Both strength and direction may be important to explain how these systems influence steering responses.

According to existing neurophysiological literature, it is difficult to evaluate the necessary magnitude of the pulse delivered on the steering wheel to elicit a compensatory reflex reaction of the arm motor system (Cooke, 1980). Nonetheless, it is reasonable to assume that the stronger the pulse, the higher the chance of yielding such a response. It can be hypothesized that pulses below the reflex threshold would be perceived as haptic cues; thus, they would

indicate to the arm motor system the direction in which the movement should be executed. On the other hand, stronger pulses may trigger compensatory reflexes. In other words, increasing the strength of the haptic cue may transform MP from an incentive to act to an irrepressible response to counteract. As such, MP would intervene lower on the continuum between symbolic and subsymbolic control, at the reflex level.

With regard to the direction of the directional cue, steering responses are expected to be faster and have fewer errors when stimuli and responses correspond spatially (Guiard, 1983). Recently, Beruscha, et al. (2010) investigated whether drivers steer toward or away from vibro-tactile stimuli applied on one side of the steering wheel. The results revealed that in an abstract environment, responses were indeed faster when the haptic cue was in the same direction as the correction needing to be initiated. However, in a driving environment, faster responses were observed when target and haptic cues were in opposite directions. The authors concluded that in the context of driving, avoidance manoeuvres in response to directional stimulation on the steering wheel might be more efficient when the indicated direction is contralateral to the danger. Moreover, other laboratory studies on reaction times have shown that faster responses can be observed with primes and targets in the opposite direction when a delay is introduced between them, the so-called negative compatibility effect (Boy and Summer, 2010; Eimer and Schlaghecken, 2003; Sumner, 2007; Wilson, Tresilian and Schlaghecken, 2010).

5.2.4 Aims of the study

Taking previous arguments into consideration, it remains to find out how directional pulses should be delivered on the steering wheel with maximal efficiency to prevent lane departures. From a theoretical point of view, the question is to determine how haptic cueing intervenes at the subsymbolic (sensorimotor) level and to what extent the driver remains in control of the corrective manoeuvres when prompted to react. To this end, the present study assessed the effects of the strength and direction of MP in lane departure situations. An improvement of corrective manoeuvres was expected when mild haptic cueing indicated the direction of the lane centre, as previously reported. The goal was to determine whether drivers could inhibit inappropriate steering response when MP was directed in the opposite direction, both with mild MP and with much stronger pulses, which may elicit fast compensatory “reflexive behaviour”.

5.3 Method

5.3.1 Participants

Eighteen drivers (14 males, 4 females, 27 years of age on average) participated in the study. Gender was not balanced since previous studies on the effect of haptic collision avoidance system have shown no effect of gender on the perception of haptic intensity, reaction times or the control of lateral position (Stanley, 2006). They had all held a driving licence for at least 2 years (mean = 8.6 years). Self-reported annual mileage for the past year ranged from 1000 to 35 000 Km (mean = 11 000 Km). None of them was familiar with lane departure warning systems. The participants reported no motion sickness.

5.3.2 Simulator

The study took place in a fixed-base driving simulator, consisting of a single-seat cockpit with full instrumentation. It is equipped with an active steering system for realistic "scale one"

force-feedback. The SCANNeR² software package was used with the CALLAS[®] dynamic vehicle model (Lechner et al. 1997). The visual environment was displayed on three 32-inch LCD monitors, one positioned in front of the driver and two laterals turned at 45° from the front one, viewed from a distance of about 1 metre and covering 115° of visual angle in width and 25° in height. The graphics database reproduced a country environment.

5.3.3 Manipulated settings of motor priming

As was the case in previous studies by Navarro et al. (2007, 2010), the assistance device delivered asymmetric oscillations on the steering wheel when the car was about to cross one of the lane edges. The first movement of the steering wheel and every second movement lasted 100 ms and both movements were directed toward the road centre. In between them, weaker (0.5 N/m) and longer (200 ms) torque pulses were directed toward the opposite side. In each lane departure situation, three cycles of MP were delivered with an oscillation frequency of 3.3 Hz (Figure 14).

Two MP settings were manipulated in the present experiment: strength (S = without assistance, light MP, strong MP), and direction (D = toward lane centre, called *ipsilateral* or toward lane departure, called *contralateral*). For light MP, the first pulse and every second pulse were set at 2 N/m. For strong MP, the pulses were three times stronger (6 N/m). Thus, light ipsilateral MP corresponded to the conditions used by Navarro et al. Light contralateral MP would be considered as an erroneous indication according to the gesture initiation logic and according to the visual scene. On the other hand, the strong contralateral MP, using torque pulses at intensities close to the highest values tested by Kullack et al. (2008), may elicit appropriate compensatory reactions toward the lane centre. On the other hand, ipsilateral strong MP might induce incorrect responses.

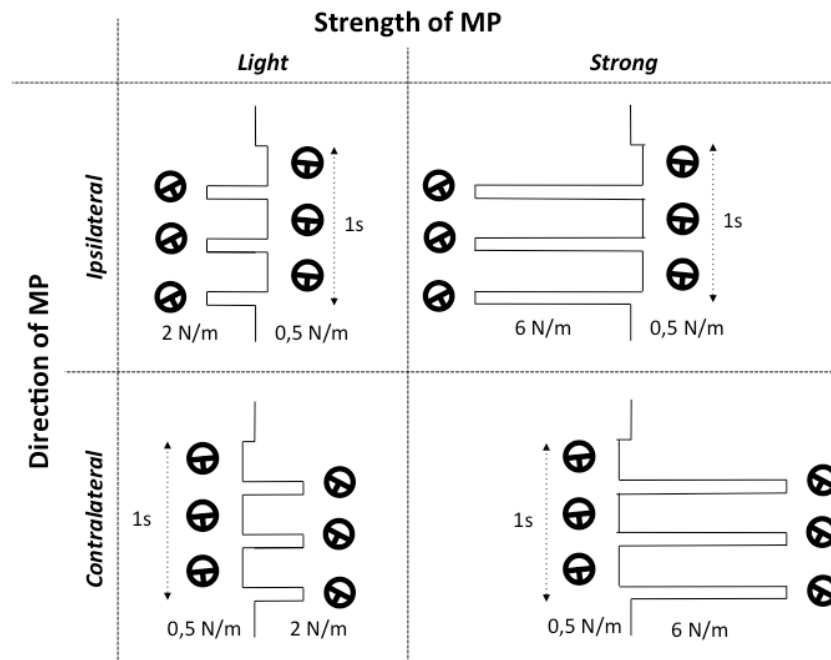


Figure. 14. Illustration of the four conditions in which MP was active during near lane departure on the right. The MP strength was either 2 N/m (light MP) or 6 N/m (strong MP). MP was oriented toward the lane centre (ipsilateral MP) or toward the side of lane departure (contralateral MP).

² <http://www.scanersimulation.com/>

5.3.4 Procedure

Crossing the strength and the direction factors resulted in six driving situations, which were repeated four times. In fact, the conditions without assistance were identical in both the ipsilateral and contralateral conditions since the strength of MP was set to zero. However, the distinction was made in order to better control the order of presentation of the conditions. Statistical analyses respected this distinction.

The 18 drivers recruited for this experiment had participated in another experiment a few days earlier. The aim of this previous experiment was to study the influence of risk expectation on recovery manoeuvres with MP. The results were reported in Deroo et al. (2012). Thus, since drivers were already accustomed to MP and to the simulator, no familiarisation was needed this time. The present experiment lasted for 50 minutes. First, participants were asked to adjust the seat position so as to achieve a realistic and pleasant driving posture. They were asked to hold the steering wheel with both hands, in the “10-to-2” position. This hand positioning was to be maintained throughout the experiment. Participants were instructed to drive in the right lane, as they usually would, and to respect a speed limit of 70 Km/h.

In each trial, drivers drove along a 3 Km country road. Each trial lasted three minutes. The road was a two-lane road with 8 straight lines and 11 bends (curvature ranging from 70 m to 500 m), with 7 turning to the left and 4 turning to the right. The driving lane was 3 m wide and delineated with a broken centreline and an edge line. Some intersections were present and other occasional vehicles were simulated to encourage participants to remain in their own lane.

In order to assess the effects of strength and direction of MP independently of any contextual factors, it was essential to provoke very similar lane departure incidents in all situations. To this end, visual occlusions were chosen (Brookhuis et al. 2003). This was achieved by suddenly blacking out all screens during driving. When visual occlusion occurred, participants were asked to stop making adjustments to steering. Thus, visual occlusions that occurred when entering bends caused a natural lane departure. In order to standardize the direction of lane departure in straight lines, a slight and imperceptible shift in the vehicle heading was introduced when the visual occlusion occurred. Drivers recovered vision when lane departure was imminent: this is precisely the point at which the driving assistance device was put into action. Experimental scenarios were structured in such a way that no oncoming vehicle was present just before and after a visual occlusion. Two occlusions were positioned in bends of similarly large curvatures (300 m on the left bend and 225 m on the right bend), one leading to lane departure to the right, the other to the left. The others took place in straight lines, also in two directions. Thus, they could occur at four different positions, but only two occurred randomly per lap. They were, therefore, relatively unpredictable.

5.3.5 Data analyses

Three indicators of steering performance were analyzed. First, the duration of lane excursion (DLE) corresponded to the effectiveness of MP in terms of safety. It has been computed as the time spent outside the safety envelope of ± 80 cm from the lane centre, after the triggering of MP. The two other variables were computed to more precisely describe the effect of MP on steering wheel control. The steering reaction time (SRT) corresponded to the time that elapsed between the triggering of the assistance device and the point at which drivers began to act on the steering wheel. Finally, the maximum steering wheel rotation speed (SWRS) was used as an indicator of the strength of the driver’s motor response. It was computed during the 450 ms that follow the start of the steering response. Figure 15 represents the relationship between all dependent variables that were analyzed to assess performance.

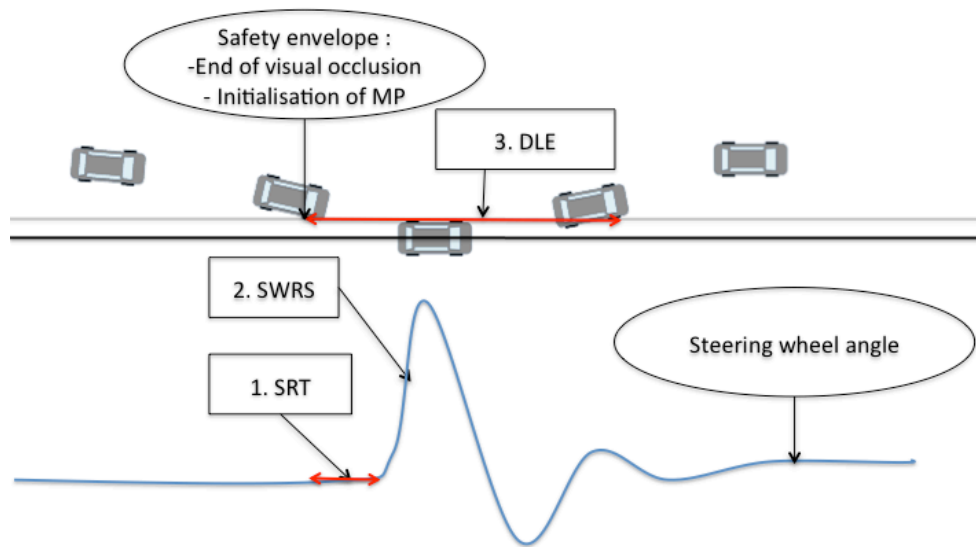


Figure. 15. The three variables; 1. Steering Reaction Time (SRT); 2. Maximum Steering Wheel Rotation Speed (SWRS); 3. Duration of Lateral Excursion (DLE).

Right bends and left bends revealed very similar patterns of results. Similarly, results for right and left departures in straight lines were also qualitatively close. So, analyses were regrouped in both cases. The significance of the effects of all independent variables was assessed for DLE, SRT, SWRS by repeated measures ANOVAs with an embedded factor for the counterbalancing of orders. For analyses with more than two comparisons, the quadratic means (I) was used. In addition, the population effects sizes were evaluated on the basis of fiducial inference. Fiducial inference (Rouanet and Lecoutre 1983, Rouanet 1996, Lecoutre and Poitevineau 2005) is a variant of Bayesian statistical inference, aimed at concluding on the population effect size (δ) on the basis of the observed effect (d), the sample size and variability. It goes beyond the test of significance, which only concludes in terms of the existence of a non-null effect. In this paper, we will give conclusions on effect sizes with a guarantee of .90. For example “ $\delta > 20$ ” will mean “the probability for δ being greater than 20 is .90”. Paired comparisons tested the effects of the two levels of MP strength relative to the condition without assistance.

5.4 Results

5.4.1 Duration of Lateral Excursion (DLE)

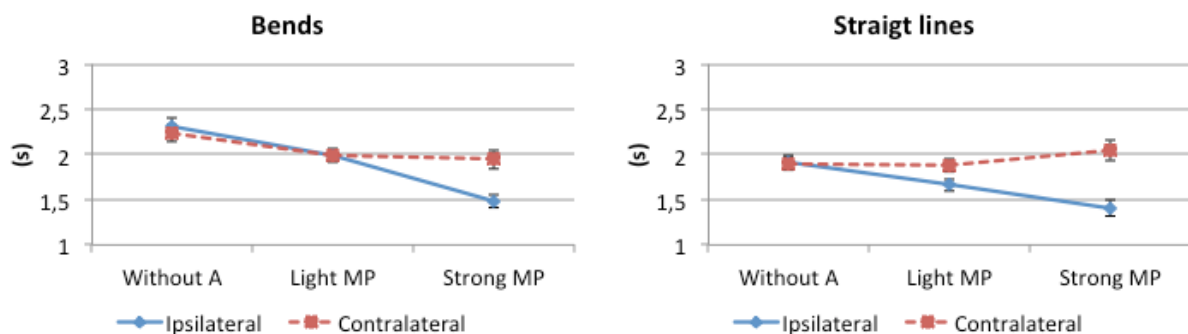


Figure. 16. Duration of lateral excursion in bends and in straight lines. Error bars represent standard errors of the means.

Table 4 - Analyses performed on the Duration of Lateral excursion (DLE).

Variable	Comparison	l or d	Bayesian conclusion	Test	LoS
DLE on bends	S.D	l=0.41		F(2,24)=13.11	p=0.0001*
	s1,s2_s3/d2	d=0.26	$\delta > 0.17$	t(12)=3.90	p=0.0021*
	s2,s3/d2	d=0.05	$ \delta < 0.19$	t(12)=0.51	p=0.6168
	s1,s2_s3/d1	d=0.57	$\delta > 0.44$	t(12)=6.10	p=0.0001*
	s2,s3/d1	d=0.51	$\delta > 0.41$	t(12)=6.96	p=0.0001*
	D/s2	d=0.01	$ \delta < 0.14$	t(12)= 0.05	p=0.9587
	D/s3	d=0.46	$\delta > 0.34$	t(12)= 5.32	p=0.0002*
DLE on straight lines	S.D	l=0.47		F(2,24)=23.78	p=0.0001*
	s1,s2_s3/d2	d=-0.07	$ \delta < 0.14$	t(12)=-1.21	p=0.2479
	s2,s3/d2	d=-0.17	$ \delta < 0.27$	t(12)=-2.02	p=0.0668
	s1,s2_s3/d1	d=0.38	$\delta > 0.27$	t(12)=4.67	p=0.0005*
	s2,s3/d1	d=0.26	$\delta > 0.15$	t(12)=3.22	p=0.0074*
	D/s2	d=0.22	$\delta > 0.13$	t(12)=3.38	p=0.0027*
	D/s3	d=0.64	$\delta > 0.51$	t(12)=6.55	p=0.0001*

Note: S: strength (s1=without assistance, s2=light MP, s3=strong MP); D: direction (d1=ipsilateral, d2=contralateral). Formalism used for comparisons: “,” means “versus”; “_” means “and”; “/” means “for”. For example, s1,s2_s3/d2 tests the difference between the condition without assistance and the two MP conditions considered together when MP was ipsilateral.

The DLE without assistance was, on average, 2.27 s in bends and 1.9 s in straight lines. The strength (S) and the direction (D) of MP showed a significant interaction in bends and in straight lines (Table 4 and Figure 16).

In bends, both light MP and strong MP significantly reduced the DLE compared to the control condition ($\delta > 0.44$ s for ipsilateral MP and $\delta > 0.17$ s for contralateral MP). For light MP, the difference between ipsilateral and contralateral MP was negligible ($|\delta| < 0.15$ s). However, an ipsilateral strong MP reduced the DLE significantly more than a contralateral strong MP ($\delta > 0.34$ s).

In straight lines, only ipsilateral (light and strong) MP notably reduced the DLE ($\delta > 0.27$ s). Contralateral MP had no significant effect and can be described as negligible ($|\delta| < 0.14$ s). Thus, the effect of the direction is significant for both light and strong MP. The difference is particularly notable with strong MP ($\delta > 0.51$ s).

In sum, the device reduced the DLE in bends, irregardless of the direction of MP, whereas a reduction of the DLE was observed in straight lines only with ipsilateral MP.

5.4.2 Steering Reaction Time (SRT)

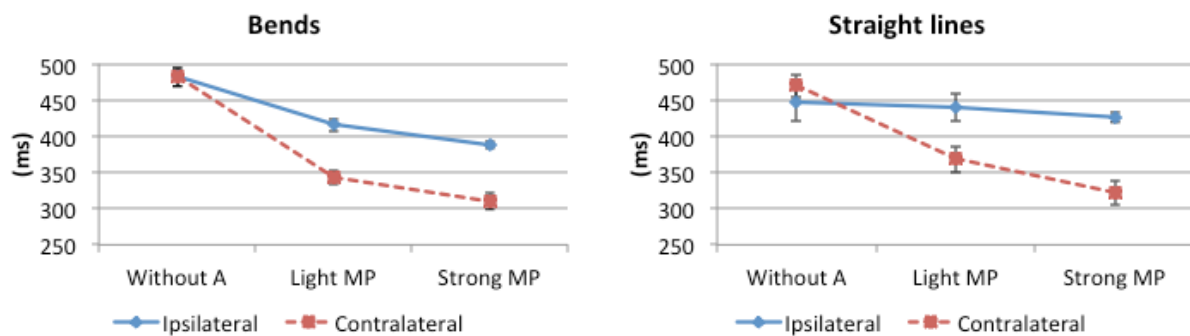


Figure. 17. Steering reaction times in bends and in straight lines. Error bars represent standard errors of means.

Table 5 - Analyses performed on the Steering Reaction Time (SRT)

Variable	Comparison	l or d	Bayesian conclusion	Test	LoS
SRT on bends	S.D	l=61.4		F(2,24)=13.91	p=0.0001*
	s1,s2_s3/d2	d=155.6	$\delta > 137.5$	t(12)=11.66	p=0.0001*
	s2,s3/d2	d=33.3	$\delta > 22.2$	t(12)=4.06	p=0.0016*
	s1,s2_s3/d1	d=80.6	$\delta > 67.5$	t(12)=8.37	p=0.0001*
	s2,s3/d1	d=27.8	$\delta > 13.2$	t(12)=2.58	p=0.0240*
	D/s2_s3	d=75.0	$\delta > 58.5$	t(12)=6.17	p=0.0001*
SRT on straight lines	S.D	l=94.0		F(2,24)=14.39	p=0.0001*
	s1,s2_s3/d2	d=124.3	$\delta > 92.6$	t(12)=5.32	p=0.0002*
	s2,s3/d2	d=45.8	$\delta > 23.7$	t(12)=2.81	p=0.0158*
	s1,s2_s3/d1	d=12.5	$ \delta < 27.9$	t(12)=1.11	p=0.2879
	s2,s3/d1	d=13.9	$ \delta < 33.8$	t(12)=0.96	p=0.3549
	D/s2_s3	d=88.2	$\delta > 73.8$	t(12)=8.32	p=0.0001*

Note: S: strength (s1=without assistance, s2=light MP, s3=strong MP); D: direction (d1=ipsilateral, d2=contralateral). Formalism used for comparisons: “,” means “versus”; “_” means “and”; “/” means “for”. For example, s1,s2_s3/d2 tests the difference between the condition without assistance and the two MP conditions considered together when MP was ipsilateral.

The SRT without assistance was, on average, 481 ms in bends and 458 ms in straight lines. The strength (S) and the direction (D) of MP showed a significant interaction in bends and in straight lines (Table 5 and Figure 17).

In bends, both light MP and strong MP notably reduced the SRT compared with the control condition ($\delta > 67.5$ ms for ipsilateral MP and $\delta > 137.5$ ms for contralateral MP). Strong MP significantly reduced SRT more than light MP when it was ipsilateral ($\delta > 13.2$ ms) or contralateral ($\delta > 22.2$ ms). SRT with contralateral MP were significantly lower than SRT with ipsilateral MP ($\delta > 58.5$ ms).

In straight lines, only contralateral MP notably reduced the SRT ($\delta > 92.6$ ms). The effect of ipsilateral MP was non-significant and negligible ($|\delta| < 27.9$ ms). Thus, SRT with contralateral MP was significantly lower than SRT with ipsilateral MP ($\delta > 73.8$ ms).

In sum, MP reduced SRT in bends, whatever its strength and direction, but the effect of contralateral MP was larger. In straight lines, the reduction of SRT was only observed with contralateral MP.

5.4.3 Steering Wheel Rotation Speed (SWRS)

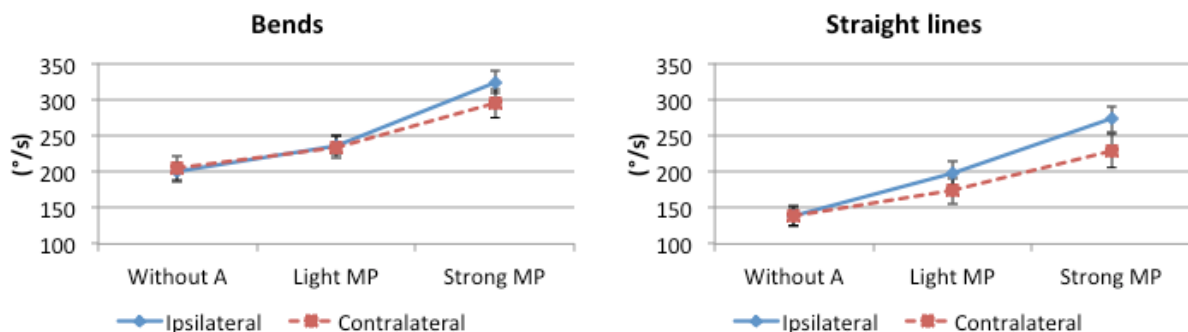


Figure. 18. Maximum steering wheel rotation speed in bends and in straight lines. Error bars represent standard errors of means.

Tableau 6 - Analyses performed on the Steering Wheel Rotation Speed (SWRS).

Variable	Comparaison	l or d	Bayesian conclusion	Test	LoS
SWRS on bends	S.D	l=26.10		F(2,24)=1.38	p=0.2702
	S	l=77.64		F(2,24)=54.63	p=0.0001*
	D	d=-08.98	<i>no gen.</i>	t(12)=-0.96	p=0.3559
	s1,s2_s3/d2	d=60.03	$\delta > 44.80$	t(12)=5.35	p=0.0002*
	s2,s3/d2	d=59.72	$\delta > 39.00$	t(12)=3.91	p=0.0021*
	s1,s2_s3/d1	d=81.08	$\delta > 62.58$	t(12)=5.94	p=0.0001*
	s2,s3/d1	d=87.50	$\delta > 64.62$	t(12)=5.19	p=0.0002*
	D/s2	d=-2.11	$ \delta < 10.93$	t(12)=-0.36	p=0.7229
	D/s3	d=29.89	<i>no gen.</i>	t(12)=1.21	p=0.2479
SWRS on straight lines	S.D	l=31.81		F(2,24)=3.94	p=0.0330*
	s1,s2_s3/d2	d=62.36	$\delta > 53.43$	t(12)=9.47	p=0.0001*
	s2,s3/d2	d=55.17	$\delta > 36.18$	t(12)=3.94	p=0.0020*
	s1,s2_s3/d1	d=97.31	$\delta > 80.22$	t(12)=7.72	p=0.0001*
	s2,s3/d1	d=75.06	$\delta > 58.92$	t(12)=6.31	p=0.0001*
	D/s2	d=24.17	$\delta > 12.36$	t(12)=2.78	p=0.0168*
	D/s3	d=44.06	$\delta > 18.54$	t(12)=2.34	p=0.0373*

Note: S: strength (s1=without assistance, s2=light MP, s3=strong MP); D: direction (d1=ipsilateral, d2=contralateral). Formalism used for comparisons: “,” means “versus”; “_” means “and”; “/” means “for”. For example, s1,s2_s3/d2 tests the difference between the condition without assistance and the two MP conditions considered together when MP was ipsilateral. *No gen.* means no Bayesian conclusion.

The SWRS without assistance was, on average, 201°/s in bends and 138°/s in straight lines. The strength (S) and the direction (D) of MP showed a significant interaction in straight lines but not in bends (Table 6 and Figure 18).

In bends, both light MP and strong MP notably increased the SWRS compared to the control condition ($\delta > 62.58^\circ/\text{s}$ for ipsilateral MP and $\delta > 44.8^\circ/\text{s}$ for contralateral MP). For light and strong MP, the difference between the ipsilateral and contralateral MP was negligible for light MP ($|\delta| < 10.93^\circ/\text{s}$); no Bayesian conclusion can be given for strong MP.

In straight lines, both light MP and strong MP notably increased the SWRS compared with the control condition ($\delta > 80.22^\circ/\text{s}$ for ipsilateral MP and $\delta > 53.4^\circ/\text{s}$ for contralateral MP). Moreover, the SWRS was higher with ipsilateral MP than with contralateral MP for light MP ($\delta > 12.36^\circ/\text{s}$) and for strong MP ($\delta > 18.54^\circ/\text{s}$).

In sum, MP increased the SWRS, whatever the direction, both in bends and in straight lines. The SWRT was higher in the ipsilateral condition, but this difference was only significant in straight lines.

5.4.4 Post-test debriefing

Post-test debriefing revealed that none of the drivers perceived that the direction of MP was manipulated. They were not aware that MP was sometimes directed away from the lane centre, even with strong MP.

5.5 Discussion

The aim of the present paper was to investigate how different strengths and directions of MP determine steering behaviour during lane departure recovery. At the centre of the study was the question of drivers' ability to control the effects of MP when directional pulses are delivered on the steering wheel. In summary, the results confirm that MP of mild intensity that is directed toward the lane centre, as originally proposed by Navarro et al. (2007), reduces the duration of lateral excursion. This is due to a small reduction in steering reaction

times and an increase in steering wheel rotation speed. This pattern of results was also observed, and could even be seen to have increased, when MP delivered steering pulses of much higher intensity in the direction of the lane centre. Thus, no compensatory reaction was observed. When MP was directed in the opposite direction, toward the side of lane departure, a large reduction in steering reaction times was observed. However, the execution of the corrective response was not as efficient as with ipsilateral MP, as attested by a significantly smaller reduction in lane departure duration. The following discussion will first address the question of the nature of the MP-induced response, excluding the hypothesis of a compensatory reflex reaction to the steering pulses. The role of the symbolic processes in the determination of the response will also be considered. Then, we will specifically discuss the reduction of SRT with contralateral MP. Finally, we will conclude in terms of ergonomics and safety recommendations.

5.5.1 Initialization of the correction versus compensatory reaction

In all cases, drivers turned the steering wheel in the appropriate direction, whatever the strength or direction of MP. This demonstrates that the drivers were always able to inhibit the effects of MP. Since MP directly addresses steering control at the subsymbolic level, this explains why the corrective response is much more efficient than the various configurations of lane departure warning systems. Thus, it was legitimate to ask whether such a response could be inhibited; for example, in cases of system error. Furthermore, on the basis of an observed reduction of reaction times, Kullack et al. (2008) proposed that a jerk of the steering wheel in the direction of lane departure may elicit a more efficient reflex response in the opposite direction. Our results do not support this idea. The responses we observed, even with pulses of high intensity, cannot be considered as reflexes. By definition, a reflex is stereotypical and cannot be inhibited. Besides, this study demonstrated that MP should not be reduced to its effects on reaction times. It is essential to consider the whole correction manoeuvre to evaluate benefits in terms of safety. Even though ipsilateral MP did not reduce SRT as much as contralateral MP, it gave rise to sharper responses, as seen on the SWRS, and in the reduced time spent in a dangerous lateral position. Thus, it is clearly apparent that MP helped to initiate and execute the corrective gesture. Furthermore, orienting the steering pulses in the expected direction of movement is the best strategy for the design of such devices. In a case of erroneous indication, consequences may not be critical, since the direction of the response seemed to be always determined in accordance with the analysis of the driving context. In other words, the supervision of routines rapidly became efficient. This is in line with the observations reported by Deroo et al. (2012), who showed that risk expectation (processed at the symbolic level) could be evidenced on SWRS very early during the response execution. However, no effect of risk expectation was observed on SRT, which suggests that this movement parameter mainly depends on subsymbolic control.

5.5.2 Effect on steering reaction times with contralateral MP

Ipsilateral MP only marginally improved SRT. The reduction was small in bends and negligible in straight lines. By contrast, contralateral MP markedly accelerated the drivers' responses. Thus, the drivers did more than just inhibit the responses suggested by contralateral MP. They countered the device when it indicated the wrong direction, with even shorter reaction times than with ipsilateral MP. In that sense, the results reported by Kullack et al. (2008) were replicated. However, they cannot be attributed to the reflexive nature of the response since the direction of the response was in full voluntary control. It could be the case that as soon as the visual occlusion ended, drivers immediately perceived a mismatch between their vision of the vehicle's motion (heading outside the lane) and the direction of the haptic cue (prompting the hand to steer the vehicle even further in the wrong direction). It can be

hypothesized that this sensory mismatch was processed at the subsymbolic level and gave rise to a faster response than when MP was compatible with visual information. It might be considered as an equivalent to the so-called negative compatibility effect. In laboratory settings, shorter reaction times are usually observed when a delay (typically 150 ms) is introduced between a subliminal prime (an early indication of the direction of the expected response) and the target (Boy and Summer, 2010; Eimer and Schlaghecken, 2003; Sumner, 2007; Wilson, Tresilian and Schlaghecken, 2010). Driving a car is obviously a much more complex task than the previous paradigm. However, the time needed to process visual information on the car heading may correspond to the delay between priming and decision-making typically associated with negative compatibility effects. Obviously, this interpretation is quite speculative and further experiments should be conducted to test it.

5.6 Conclusions and ergonomics recommendations

This study confirmed that driving assistance devices that deliver torque pulses on the steering wheel can markedly improve the execution of recovery manoeuvres during lane departure episodes. It was established that the response consecutive to the device action always remained under the control of symbolic processes and could not be considered as reflexive, even when steering pulses were quite strong. The fastest reaction times were observed with strong contralateral pulses. However, these did not translate into increased safety benefits. Hence, a reduction in reaction times should not be an objective per se. Our results support the MP principle, according to which haptic cues delivered on the steering wheel should aim at indicating to the arm motor system the direction of the movement to be executed. The motor system may improve reaction times, but also, and more importantly, the early execution of the corrective manoeuvre.

Although increasing the strength of ipsilateral MP yielded shorter duration of lane excursion, it should not be concluded from this study that pulses of 6 N/m or higher need to be used. Navarro et al. (2010) compared the acceptance of MP and other lane departure warning systems after repetitive exposure to them. In general, the acceptance of all systems was poor, most probably due the frequency of intervention of the devices. However, it should be noted that, even though MP delivered mild steering pulses, drivers judged it as more intrusive and therefore less acceptable. Obviously, a stronger intervention would be massively rejected. On the other hand, this kind of device may be designed only for situations that become so critical an emergency response is required. If the automation intervention is restricted to these rare occurrences, the strength of the haptic cue may be set higher, with efficiency being sought more than acceptance. It could be argued, however, that fully automated countermeasures are preferable to trying to influence the behaviour of drivers in very critical situations.

Finally, it may be wise to calibrate the device action as a function of the level of attention or vigilance. MP was originally designed for situations in which the driver is distracted, but in full possession of his senses. This raises the question of how a drowsy driver (for example, drunk or sleepy) would respond to the unexpected action of an MP-like device, something that should be investigated.

Acknowledgements

This research was supported by the ANR-VTT: PARTAGE project 0866C0222.

5.7 References

Anderson, J.R., Bothell, D., Byrne, M.D., Douglass, S., Lebiere, C. & Quin, Y.L. (2004). An integrated theory of the mind. *Psychological Review*, 111, 1036-1060.

- Azzi, S., Reymond, G., Mérienne, F. & Kemeny, A. (2011). Eco-driving performance assessment with in-car visual and haptic feedback assistance. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 11, 041005.
- Beruscha, F., Wang, L., Augsburg, K. & Wandke, H. (2010). Do drivers steer toward or away from lateral directional vibrations at the steering wheel ? Josef Krems, Tibor Petzoldt, Matthias Henning (Eds.) *Proceedings of European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems HUMANIST publications* – Lyon, 2010.
- Beruscha, F., Augsburg, K. & Manstetten, D. (2011). Haptic warning signals at the steering wheel: A literature survey regarding lane departure warning systems, *Haptics The Electronic Journal of Haptics Research*, 4, 16-18.
- Boy, F. & Sumner, P. (2010). Tight coupling between positive and reversed priming in the masked prime paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 36, 892–905.
- Brookhuis, K., A., de Waard, D. & Fairclough, S., H. (2003). Criteria for driver impairment, *Ergonomics*, 46, 433-445.
- Cooke, J.D. (1980). The organization of simple, skilled movements, In: G.E Stelmach, J. Requin (eds.), *Tutorials in motor behaviour* (pp. 199-212). North-Holland Publishing Company, Amsterdam.
- de Rosario, H., Louredo, M., Díaz, I., Soler, A., Juan Gil, J., Solaz J.S. & Jornet, J. (2010). Efficacy and feeling of a vibrotactile frontal collision warning implemented in a haptic pedal. *Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour*, 13, 80-91.
- Deroo, M., Hoc, J.M. & Mars, F. (2012). Influence of risk expectation on haptically cued corrective manoeuvres during lane departure. *Ergonomics*, 55, 465-475.
- Eimer, M. & Schlaghecken, F. (2003). Response facilitation and inhibition in subliminal priming. *Biological Psychology*, 64, 7–26.
- Griffiths, P.G. & Gillespie, R.B. (2005). Sharing control between humans and automation using haptic interface: primary and secondary task performance benefits. *Human Factors* 47, 574–590.
- Guiard, Y. (1983). The lateral coding of rotations: A study of the Simon effect with wheel-rotation responses. *Journal of Motor Behavior*, 15, 331–342.
- Ho, C., Tan, H., Z. & Spence, C. (2006). Assessing the effectiveness of “intuitive” vibrotactile warning signals in preventing front to rear-end collisions in a driving simulator. *Accident Analysis & Prevention*, 38, 988-996.
- Hoc, J.M., Young, M.S. & Blosseville, J. M. (2009). Cooperation between drivers and automation: implications for safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10, 135-160.
- Hoc, J.M. & Amalberti, R. (2007). Cognitive Control Dynamics for Reaching a Satisficing Performance in Complex Dynamic Situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1, 22-55.
- Kuge, N., Boer, E.R., Yamamura, T., Ward, N.J. & Manser, M.P. (2006). Study on driver’s car following abilities based on an active haptic support function. *SAE Technical Paper* 2006-01-0344, doi:10.4271/2006-01-0344.

- Kullack, A., Ehrenpfordt, I., Lemmer, K., & Eggert, F. (2008). ReflektAS: lane departure prevention system based on behavioural control. *IET Intelligent Transport Systems*, 2, 285-293.
- Kullack, A., Ehrenpfordt, I., & Eggert, F. (2010). REFLEKTAS -- Further Tests of a Fast and Reliable Lane Departure Prevention System for Critical Situations. In: *Proceedings of the 16th ITS World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*. Stockholm, Sweden, 6pp.
- Lechner D., Delanne Y., Schaefer G., & Schmitt V. (1997). Méthodologie de validation du logiciel de dynamique automobile CALLAS. SIA 970202. *Congrès SIA Lyon*, Avril 1997. Reprinted in *Ingénieurs de l’automobile* N°713, May 1997.
- Lecoutre, B. & Poitevineau, J. (2005). Le logiciel “LePAC”. *La Revue de Modulad*, 33 (whole volume). Available from: <http://www.univ-rouen.fr/LMRS/Persopage/Lecoutre/PubBL.html> [Accessed 3 January 2012] (English version)
- Navarro, J., Mars, F. & Hoc, J. M. (2007). Lateral control assistance for car drivers: a comparison of motor priming and warning systems. *Human Factors*, 49, 950-960.
- Navarro, J., Mars, F., Forzy, J., El-Jaafari, M. & Hoc, J. (2010). Objective and subjective evaluation of motor priming and warning systems applied to lateral control assistance. *Accident Analysis & Prevention*, 42, 904-912.
- Navarro, J., Mars, F., & Young, M.S. (2011). Lateral control assistance in car driving: classification, review and future prospects. *IET Intelligent Transport Systems*, 5, 207-220.
- Onimaru, S. & Kitazaki, M. (2010). Visual and tactile information to improve drivers performance. In: *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference (VR)* (pp. 295-296), Waltham, Massachusetts.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. & Wickens, C. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 30, 286-297.
- Prochazka, A., Clarac, F., Loeb, G.E., Rothwell, J.C. & Wolpaw, J.R. (2000). What do reflex and voluntary mean? Modern views on an ancient debate. *Experimental Brain Research*, 130, 417-432.
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction*. Elsevier, Amsterdam.
- Rouanet, H. (1996). Bayesian methods for assessing importance of effects. *Psychological Bulletin*, 119, 149–158.
- Rouanet, H. & Lecoutre, B. (1983). Specific inference in ANOVA: from significance tests to Bayesian procedures. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 36, 252–268.
- Sumner, P. (2007). Negative and positive masked-priming-Implications for motor inhibition. *Advances in Cognitive Psychology*, 3, 317–326.
- Suzuki, K. & Jansson, H. (2003). An analysis of driver’s steering behaviour during auditory or haptic warnings for the designing of lane departure warning system. *Japan Society of Automotive Engineers Review*, 24, 65-70.

- Stanley, L.M. (2006). *Haptic and auditory interfaces as collision avoidance technique during roadway departures and driver perception of these modalities*. Doctoral dissertation, Montana State University, Montana.
- UNECE (2007). *Statistics of Road Traffic Accidents in Europe and North America*, 51st ed. UNECE, Geneva, 46–61.
- Wilson, A.D., Tresilian, J.R. & Schlaghecken, F. (2010). Continuous priming effects on discrete response choices. *Brain and Cognition*, 74, 152-159.

Chapitre 6 - Influence de la représentation du risque sur l’amorçage haptique de correction de sortie de voie

« En dernière analyse, toute chose n'est connue que parce qu'on veut croire qu'on la connaît. »

Cycle de Dune : La maison des Mères, 1985, **Franck Herbert**

SOMMAIRE

- 6.1 Résumé étendu en français
 - 6.2 Introduction
 - 6.3 Method
 - 6.4 Results
 - 6.5 Discussion
 - 6.6 Conclusion
 - 6.7 References
-

6.1 Résumé étendu en français

Cet article est publié dans *Ergonomics*. Un résumé étendu en français est proposé afin d’introduire l’article qui est reproduit dans son intégralité en anglais. Seules quelques modifications cosmétiques ont été ajoutées par rapport à l’article publié (couleurs des figures et mise en page), afin de conserver une cohérence tout au long de la thèse.

6.1.1 Objectif de l’étude

Bien que cette étude ait été réalisée, chronologiquement, avant celle du chapitre précédent, il nous a semblé plus logique d’inverser cet ordre dans le fil conducteur de la thèse. Dans le chapitre précédent nous avons, en effet, commencé par étudier le rôle de la force et de la

direction de l’amorçage et conclu à la capacité des conducteurs à inhiber, et même contrer l’amorçage moteur lorsque la situation l’exigeait. Dans ce chapitre nous allons nous intéresser plus spécifiquement au réglage fin de la correction en fonction du risque perçu par le conducteur. Ainsi, après avoir démontré que l’amorçage moteur ne produisait pas de réflexe au sens de mouvements non inhibables nous allons affiner cette démonstration en étudiant la capacité à moduler le geste de correction en fonction des attentes en termes de représentation du risque chez les conducteurs.

6.1.2 Introduction

Dans ce chapitre nous reprenons les mêmes éléments théoriques que ceux de l’expérimentation précédente. La problématique de cette étude est de préciser le fonctionnement du processus de supervision (symbolique) du modèle de Hoc et Amalberti (2007) lors d’intervention d’un dispositif au niveau des boucles sensori-motrices (subsymbolique). Deux axes seront étudiés.

Dans la poursuite du chapitre précédent nous reprenons un axe identique, qui pose la question du lien entre puissance de l’amorçage délivré par l’AM et son effet. Ainsi, il s’agira tout d’abord de préciser si un amorçage plus puissant produit des effets plus importants au niveau moteur et surtout nous étudierons l’articulation entre cet axe et le second axe.

Le second axe nous conduira, quant à lui, à déterminer de quelle façon les conducteurs sont capables de moduler leur geste de correction en fonction du contexte. La question de la modulation renvoie à la relation entre traitement symbolique du danger par le conducteur et intervention au niveau subsymbolique du dispositif. Autrement dit, nous étudierons la capacité des conducteurs à moduler les effets du dispositif dans des degrés de dangers différents.

6.1.3 Méthode

La même méthode que celle du chapitre précédent a été utilisée. Pour rappel 18 conducteurs ont été placés dans des situations critiques de sortie de voie, en virage et en ligne droite. Les conducteurs réalisaient plusieurs fois un itinéraire sur route de campagne, à la vitesse de 70 Km/h. Durant cet itinéraire, des situations de sortie de voie involontaire étaient provoquées de façon aléatoire. Ces situations étaient créées à l’aide de la méthode des occlusions visuelles.

Le premier facteur étudié, présent également dans le précédent chapitre de cette thèse, est celui de la force de l’assistance. Tous les conducteurs ont testé 3 conditions de conduite, une phase de conduite sans assistance et deux réglages, plus ou moins puissants, du dispositif AM (Léger et Puissant). L’AM se déclenche au-delà d’une certaine limite de sécurité (80 cm du bord de voie) et provoque des oscillations plus amples vers le centre de cette voie. Néanmoins, ces oscillations ne conduisent pas à une modification de la trajectoire sans action du conducteur.

Le deuxième facteur manipulé est celui de la consigne de risque. Cette consigne était apparente durant les occlusions visuelles provoquant les sorties de voie et avait pour objectif d’étudier le rôle de la supervision (du contrôle symbolique) sur la modulation des effets de l’assistance (au niveau subsymbolique). Ainsi, les attentes des conducteurs variaient quant à la gravité des risques encourus (risque mineur contre risque majeur). Dans le cas de risque majeur, des cônes de chantier apparaissaient également en bord de voie à la fin de l’occlusion visuelle, confirmant un danger maximal.

Les résultats ont été analysés à partir de 4 variables. La *durée de sortie de voie* correspond au temps passé par le véhicule au-delà d'une certaine limite par rapport au centre de la voie. Ensuite, le *temps de réaction* correspond au temps entre la fin de l'occlusion visuelle et l'initiation de la manœuvre de correction par le conducteur. Enfin, le *pic d'accélération du volant* correspond à la force de la manœuvre de correction. Ces pics étaient enregistrés pendant les 450 ms suivant l'initiation de la réponse motrice. La dernière variable, *l'angle volant maximum*, correspond à l'angle maximum produit sur le volant lors de la manœuvre de correction. Il intervient peu de temps après le pic d'accélération volant.

La significativité des effets des facteurs a été mesurée à l'aide d'ANOVA. De plus, afin d'évaluer la taille des effets, des analyses fiducio-bayésiennes ont été réalisées. Ces analyses permettent de traduire l'incertitude sur la valeur de l'effet (δ) dans la population parente, en la situant dans des intervalles probabilisés (la garantie choisie est ici .90). Par exemple, l'expression « $\delta > 0.68$ sec » signifie « $\text{Prob}(\delta > 0.68 \text{ sec}) = .90$ ». (Lecoutre & Poitevineau, 2005; Rouanet, 1996; Rouanet & Lecoutre, 1983).

6.1.4 Résultats

En virage, l'ANOVA révèle un effet significatif du facteur assistance ($F(2,24)=29.04$, $p<.001$) sur la durée de sortie de voie et l'absence d'interaction entre ce facteur et la consigne de risque. Les analyses fiduciaires montrent une réduction notable de la durée de sortie de voie avec l'AM puissant par rapport à sans assistance ($\delta > 0.43$ sec). La consigne de risque a également un effet significatif, quelles que soient les modalités de l'assistance ($t(12)=3.31$, $p<.007$). Les conducteurs sont plus rapides à revenir au centre de la voie avec une consigne de risque majeur ($\delta > 0.08$ sec).

Pour le temps de réaction, l'ANOVA révèle également un effet significatif du facteur assistance ($F(2,24)=29.41$, $p<.0001$), pas d'effet significatif de la consigne de risque et pas d'effet d'interaction. L'assistance réduit donc les temps de réaction de façon notable (AM léger : $\delta > 36$ ms ; AM puissant : $\delta > 65$ ms), mais pas la consigne de risque ($|\delta| < 13$ ms).

Enfin, le facteur assistance a généré des pics d'accélération du volant plus importants. L'ANOVA révèle un effet significatif du facteur assistance ($F(2,24)=40.20$, $p<.0001$) et l'absence d'interaction entre les deux facteurs. La consigne de risque a également généré des pics d'accélération plus importants ($t(12)=3.00$, $p<.02$).

Des résultats similaires, mais de moindre amplitude, sont observés en ligne droite pour les trois premières variables. Une distinction entre virage et ligne droite s'opère par contre sur l'angle volant maximum. La consigne de risque a un effet notable en virage ($\delta > 6^\circ$) mais plus petit en ligne droite ($|\delta| < 4^\circ$). Il n'y a pas d'effet d'interaction entre risque et assistance et l'assistance augmente significativement l'angle maximum en virage ($F(2,24)=36.70$, $p<.0001$) et en ligne droite ($F(2,24)=70.60$, $p<.0001$).

6.1.5 Discussion et conclusion

Globalement, l'AM diminue les durées de sortie de voie, quelles que soient les modalités des autres facteurs (consigne de risque et force de l'amorçage). Une analyse détaillée des indicateurs étudiés nous permet de préciser comment le processus de supervision permet de moduler et d'inhiber les effets de l'AM.

L'assistance et la consigne de risque ont permis de réduire les durées de sorties de voie. Toutefois, si les conducteurs ont réagi plus rapidement avec l'AM, cela n'a pas été le cas avec la consigne de risque. D'une part, cela semble confirmer l'action au niveau subsymbolique du dispositif d'AM. D'autre part, ce n'est que lors du réglage du mouvement de correction que le

traitement symbolique a pu s’exercer et que des différences, entre consignes, ont été constatées dans le pic d’accélération du volant. Ces pics ayant été enregistrés 450 ms après l’initiation du mouvement, c’est donc très rapidement que la supervision a pu agir sur ce réglage, mais pas dès l’initialisation du mouvement.

La différence constatée entre virages et ligne droite sur les angles maximum du volant nous conduit à indiquer que le traitement du risque induit par la différence de géométrie est également intervenu pour moduler l’exécution de la réponse motrice. Les conducteurs ont respecté la consigne, en modulant l’angle en fonction de la consigne en virage, mais le respect de cette consigne aurait produit des corrections trop rapides en lignes droites, ce qui aurait été porteur de risque en soi.

Cette présente étude nous a donc permis de conclure sur l’utilité de cette assistance, qui, tout en étant plus performante que les simples avertissements (Navarro et al., 2007), produit un effet qui reste contrôlable par les conducteurs. Ces derniers ont été capables de prendre en compte des éléments du contexte (représentation du risque, géométrie de la route) pour moduler leur manœuvre de correction. Nous pensons alors que la force de l’assistance devrait être adaptée en fonction de la situation rencontrée. Un risque élevé, en virage pourrait nécessiter un réglage plus puissant alors qu’un risque plus mineur en ligne droite nécessite sans doute un amorçage plus léger.

Influence of risk expectation on haptically cued corrective manoeuvres during near lane departure

Deroo M., Hoc J.M., & Mars F.

Abstract

Some driving devices are designed to prevent road departures. One such device, Motor Priming (MP), provides small pulses to the steering wheel towards the lane centre, without correcting the trajectory itself. Compared with other lane departure warning systems, its higher efficacy has been demonstrated; it is hypothesised that this relies on the action of haptic cues at the sensorimotor level (Navarro *et al.* 2007, 2010). The way in which corrective manoeuvres, primed by MP, can be influenced by processes that operate at higher levels of cognitive control, such as risk evaluation, is an issue. Results showed that MP improved all indicators of steering efficiency, starting with reaction times. Risk expectation and situation analysis did not influence reaction times but came into play soon after the corrective manoeuvre was initiated. Thus, although MP triggered the response at the sensorimotor level, higher levels of cognition (symbolic control) quickly modulated the execution of the corrective manoeuvre.

Keywords: human-machine cooperation; driving assistance device; cognitive control; steering behaviour

Statement of relevance

This paper showed that corrective manoeuvres following directional pulses on the steering wheel (motor priming) are modulated by risk expectation. The conclusion may be of interest for designers of haptics-based automation such as lane departure warning and lane keeping assistance systems.

6.2 Introduction

Lane departure is a major feature of car accidents. In the United States, for example, it is a factor in 66% of accidents involving just one light vehicle (Najm *et al.* 2007). As the search for solutions to this problem progresses, driving assistance devices are becoming increasingly sophisticated. One complication is that drivers need to be supported in many contexts (Baldwin, 2011). In fact, each class of situation needs a specific intervention with a certain degree of automation (Parasuraman *et al.* 2000). For example, smooth deviation in straight lines does not need the same intervention as distraction close to a bend. One should also take into account the voluntary risk-taking behaviours of some drivers (Jonah 1997). Consequently, several types of devices have been designed (Hoc *et al.* 2009, Navarro *et al.* 2011). For example, lane departure warning systems (LDWS) are created to improve a driver's alertness when a situation becomes dangerous. Such a device applies mutual control (or cross-checking) of the driver's task (Hoc *et al.* 2009). It intervenes to criticise the driver's action. By way of contrast, lane-keeping assistance systems (LKAS) share control of the vehicle with the driver (Griffiths and Gillespie 2005).

As long as drivers are legally responsible for their vehicle, they will need to be able to control and adapt their action to various contexts with many unpredictable events. Thus, in whatever way an assistance device intervenes, the driver should stay in charge of steering the vehicle and be able to modulate or inhibit the manoeuvres suggested by the device (Abbink, *et al.* 2011).

6.2.1 Motor priming

This idea is particularly important with a device called “motor priming” (MP), which has been proposed by Navarro *et al.* (2007, 2010). In cases of near lane departure, the device provides mild steering pulses towards the lane centre. These pulses do not correct the trajectory itself, but preactivate (prime) the corrective gesture. Results gathered by Navarro *et al.* (2007, 2010) support the idea that MP not only improves situation diagnosis, in the same way as warning systems can facilitate the orientation of visuospatial attention (Ho *et al.* 2006), but also acts at the motor level by providing some directional cues to the hands via the haptic modality. As such, it aims to improve on warning systems with only minimal intervention on the steering wheel, in contrast to corrective lane-keeping assistance systems.

In their studies of a device which also uses a directional pulse on the steering wheel, Suzuki and Jansson (2003) found that some drivers turned the steering wheel in the wrong direction. Such erroneous responses may be explained, in part at least, by the lack of explanation given to the participants. Alternatively, directional pulses may have induced the drivers to make reflexive counteractions, turning the steering wheel without considering the driving context. Indeed, Kullack *et al.* (2008) proposed a system called ReflekAS, based on the principle that steering pulses in the direction of lane departure can elicit fast and stereotyped responses in the opposite direction. Thus, when designing assistance devices that act at the level of motor control, one must take the utmost care to examine the ability of drivers to stay in full control of their vehicle.

6.2.2 Risk analysis

The present paper specifically addresses the question of how responses elicited by MP may be modulated by taking the context into account. Indeed, modulation, like inhibition, is a critical test used to discriminate between voluntary and reflexive movements (Prochazka *et al.* 2000). When MP intervenes during lane departures, drivers interpret the situation and need to stay in control of their vehicles. In other words, even though MP prompts drivers to take action in a given direction, they need to be able to modulate their steering responses in relation to the current situation.

Situations that are identical from the point of view of the automated device can correspond to various levels of perceived risk from the driver’s point of view. One example is the well-documented practice of cutting bends (Mars 2008, Couton-Jean *et al.* 2009). From a purely geometric analysis, the vehicle is close to crossing one of the edge lines; from the driver’s point of view, however, cutting a bend reduces lateral acceleration and thus offers a more comfortable way of driving.

In actual fact, humans analyse contextual elements and corresponding risk according to different levels of cognition, operating from highly symbolic representations or subsymbolic perceptual cues. In order to illustrate this point, Lewis-Evans and Charlton (2006) identified the effects of behavioural adaptation on drivers’ speed and lateral displacement in response to manipulations of road width. Their results underline the inability of participants to identify changes in road width, which suggests that risk was processed below the level of consciousness. On the other hand, at the symbolic level, humans integrate potential danger in their situation analysis. For example, the consequences of lane departure are not the same when driving on roads surrounded by flat, open fields as they are on roads on the edge of a ravine. One conclusion could be that, as a last resort, analysis of the context should allow drivers to modulate the effects of assistance devices in relation to the level of perceived hazard.

According to Michon (1979), a *hazard* is a situation within which there is some probability that danger could occur; in other words, it is the danger causal field that influences the gravity of that situation and the probability of danger (Hoc 1996). So, from the driver's point of view, a *risk* can be understood as the danger and the probability of its occurrence. Thus, the aim of driving assistance devices, including MP, is to reduce the gravity of the hazard and, consequently, the risk of road departure. It remains to be determined how drivers cope with the different levels of danger; something which is not taken into account by the devices themselves. This is especially the case in the context of dynamic situations with high temporal pressure, such as when lane departure is imminent.

6.2.3 Cognitive control

It is acknowledged that driving is a dynamic situation in which different levels of control interact (Michon 1985). The model of cognitive control proposed by Hoc and Amalberti (2007), which emphasises the roles and interrelations of four main control modes, is a good choice for interpreting levels of intervention of MP and context analysis. In this model, two dimensions are crossed - symbolic vs. subsymbolic control, and external vs. internal control. The level of abstraction of the data required for control (symbolic vs. subsymbolic) is very close to the Skill-Rule-Knowledge model introduced by Rasmussen (1986) and can be understood as a continuum between two opposite levels of control. Symbolic control is close to the processes that are conscious or controlled, whilst subsymbolic control can be understood as something more automated, close to the sensorimotor control loops. Hoc and Amalberti (2007) highlighted the role of (symbolic) supervision, which calibrates the execution of (subsymbolic) routines, as previously modelled by Anderson *et al.* (2004).

Within the framework of Hoc and Amalberti's model, MP can be understood as a first intervention at a subsymbolic (motor) level, which is then validated by symbolic control (situation diagnosis). Hence, even though MP acts at the subsymbolic level, the driver should be able to choose whether or not to perform the primed response, calibrate it or even stop its execution by means of supervision. This assertion will be studied using two strengths of MP; the first is similar to the MP used by Navarro *et al.* (2007, 2010); the second is three times stronger. This factor has been introduced because it is hypothesised that the reflexive counteractions reported by Suzuki and Jansson (2003) and Kullack *et al.* (2008) result from stronger torque pulses; these may tap into lower sensorimotor neural systems that are lower along the continuum between symbolic and subsymbolic processes. Two other hypotheses are made. First, the subsymbolic intervention of MP will reduce the risk of lane departure by improving drivers' responses. Second, risk expectation resulting from the symbolic processing of the context will lead to the modulation of the MP's influence on response execution.

6.3 Method

6.3.1 Participants

Eighteen subjects (14 males, 4 females, 27 years of age on average) participated in the study. Gender was not balanced since previous studies on the effect of haptic collision avoidance system showed no effect of gender factor on the haptic intensity perception, the reaction time or the control of lateral position (Stanley, 2006).

All drivers had held a driving licence for at least 2 years (mean = 8.6 years). Self-reported annual mileage for the past year ranged from 1,000 to 35,000 Km (mean = 11,000 Km). None of them was familiar with lane departure warning systems. No motion sickness was observed. At most, a very mild sensation of heat (without nausea) was reported by a few participants.

6.3.2 Equipment

The study took place in a fixed-base driving simulator, consisting of a single-seat cockpit with full instrumentation. It was equipped with an active steering system for realistic "scale one" force-feedback. The SCANNeRII®³ software package was used with the CALLAS® dynamic vehicle model (Lechner *et al.* 1997). The visual environment was displayed on three 32-inch LCD monitors, one in front of the driver and two laterals, inclined at 45° from the front one. The monitors were viewed from a distance of about 1 metre and covered 115° of visual angle in width and 25° in height. The graphics database reproduced a country environment.

6.3.3 Driving Assistance Device

Three driving conditions were tested, one without assistance and two with different MP strengths (light and strong MP). MP delivers small asymmetric oscillations on the steering wheel when the car is about to cross one of the lane edge lines (Figure 19). The first movement of the steering wheel and every second movement are directed toward the road centre, with a stronger and shorter torque pulse (2 N/m for light MP and 6 N/m for strong MP, lasting 100 ms) than those directed towards the side of lane departure (0.5 N/m for both light and strong MP, lasting 200 ms). MP was delivered during a one-second period with an oscillation frequency of 3.3 Hz.

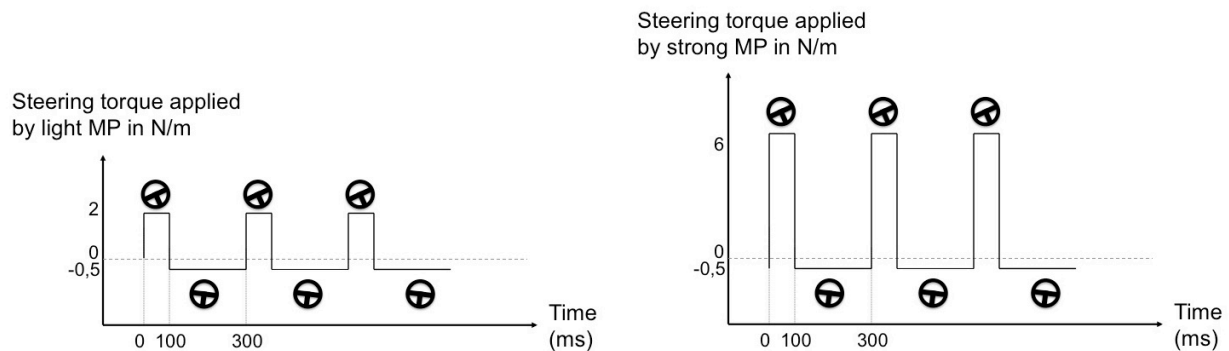


Figure. 19. Schematic representation of light and strong MP in action during a lane departure to the right. Left: light MP; Right: strong MP

6.3.4 Procedure

The experiment lasted for 60 minutes. First, participants were asked to adjust the seat position so as to achieve a realistic and pleasant driving posture. They were asked to hold the steering wheel with both hands, in the "10-to-2" position. This hand positioning was to be maintained throughout the experiment. They then drove for 10 minutes in order to become accustomed to the simulator. Participants were instructed to drive in the right lane, as they usually would, and to respect a speed limit of 70 Km/h. The functioning principle of the assistance device was explained.

The experiment consisted, for all drivers, in performing four complete laps of a country road route for each driving condition. Each lap lasted three minutes and corresponded to a distance of about 3 Km. The road was a single-carriageway road that was a mixture of curved and straight sections. It consisted of 8 straight lines and 11 bends, 7 turning to the left and 4 turning to the right. The driving lane was 3 m wide and delineated with a broken

³ <http://www.scanersimulation.com/>

centreline and a edge line. Some intersections were present and other occasional vehicles were simulated encouraging participants to remain in their own lane.

In order to assess the effects of driving assistance and risk expectation independently of any contextual factors, it was essential to provoke very similar lane departure incidents in all situations. To this end, visual occlusions were chosen (Brookhuis *et al.* 2003). This was achieved by suddenly blackening all screens. This technique is more traditionally used to evaluate how much visual input the driver needs to maintain good lane-keeping performance when using in-vehicle systems (Godthelp *et al.* 1984, van der Horst 2004). In the present experiment, visual occlusions permitted high control of the timing and positioning of lane departure events. They could occur at four different positions, but only two occurred per lap. They were, thus, relatively unpredictable. Experimental scenarios were structured in such a way that no oncoming vehicle was present just before and after a visual occlusion. Two occlusions were positioned in bends of similar large curvature (300 m on the left bend and -225 m on the right bend), one leading to lane departure to the right, the other to the left. The others took place in straight lines, also in two directions. When visual occlusion occurred, participants were asked to stop making adjustments to steering. Thus, visual occlusions that occurred when entering bends caused a natural lane departure toward the outside edge line in left bends and toward the centreline in right bends. In order to standardise the direction of lane departure in straight lines, a slight and imperceptible shift in the vehicle heading was introduced when the visual occlusion occurred. Drivers recovered vision when lane departure was imminent: this is precisely the point at which the driving assistance device was put into action.

Following simulator training, two levels of risk expectation were introduced to driving assistance conditions. During visual occlusion, either “Minor risk” (in green) or “Warning! Major risk” (in red) was displayed on the screen (Figure 20). In addition, in the major risk situation, traffic cones appeared on the edge of the road to confirm the cost of the lane departure. Thus, the level of risk was manipulated at the symbolic level, independently of perceptual cues that would have informed on imminent lane departure if drivers had been allowed to see they were drifting out of lane. Although these two levels of risk processing can hardly be dissociated in real conditions, the use of textual warning allowed the subjective evaluation of risk to be specifically manipulated. Assistance setting (without assistance, light MP, strong MP) and risk expectation (minor risk, major risk) were fully counterbalanced.



Figure. 20. Two levels of induced risk. Left: minor risk; Middle: major risk; Right: traffic cones following major risk induction.

6.3.5 Data analysis

Figure 21 represents the relation between all dependent variables that were analysed to assess performance. The main variable was the time spent by drivers outside the safety envelope of +80 cm from the lane centre after the end of the visual occlusion (Duration of Lateral Excursion: DLE). The Steering Reaction Time (SRT) corresponded to the time elapsed

between the end of the visual occlusion and the time when drivers began to act on the steering wheel. The peak of Steering Wheel Rotation Speed (SWRS) was used to evaluate the sharpness of the steering movement when it was initiated. It was computed during the 450 ms following the start of the steering response. Finally, the Steering Wheel Maximum Angle (SWMA) corresponded to the magnitude of the steering reaction.

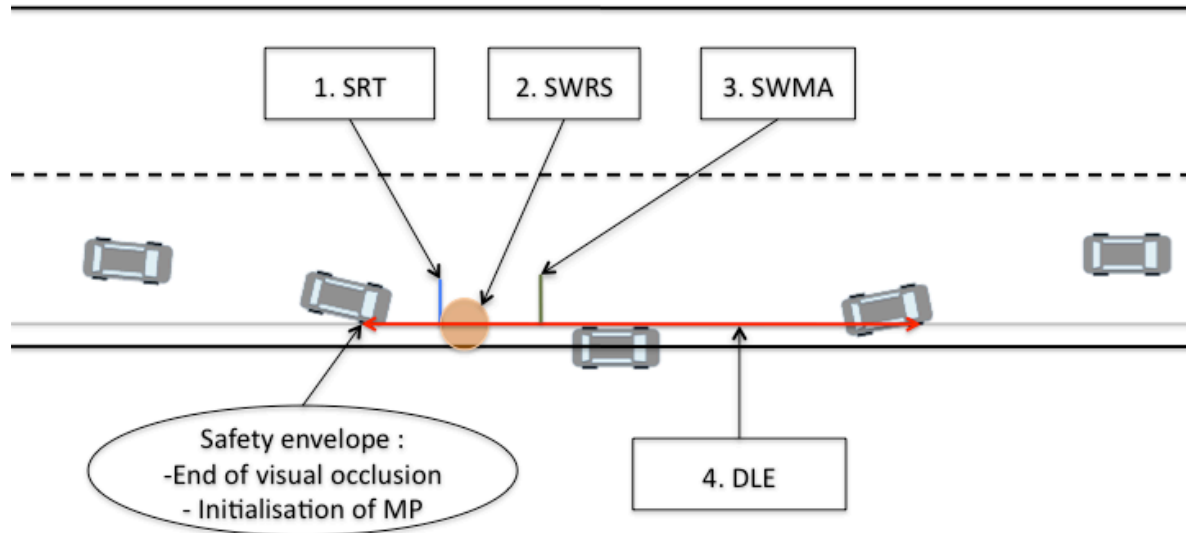


Figure. 21. The four variables; 1. Steering Reaction Time (SRT); 2. Peak of Steering Wheel Rotation Speed (SWRS); 3. Steering Wheel Maximum Angle (SWMA); 4. Duration of Lateral Excursion (DLE).

The significance of the effects of all independent variables was assessed for DLE, SRT, SWRS and SWMA by repeated measures ANOVAs. In addition, the population effects sizes were evaluated on the basis of fiducial inference. Fiducial inference (Rouanet and Lecoutre 1983, Rouanet 1996, Lecoutre and Poitevineau 2005) is a variant of Bayesian statistical inference, aimed at concluding on the population effect size (δ) on the basis of the observed effect (d), the sample size and variability. It goes beyond the test of significance, which only concludes in terms of the existence of a non-null effect. In this paper, we will only give the conclusions on effect sizes with a guarantee of .90. For example “ $\delta > 20$ ” will mean “the probability for δ being greater than 20 is .90”. Paired comparisons tested the effects of the two levels of MP strength relative to the condition without assistance. When both tests concluded a significant and notable effect of MP, a third comparison between light and strong MP was performed.

6.4 Results

Right and left lane departures gave rise to very similar patterns of results. Thus, analyses were regrouped, both in bends and in straight lines. Furthermore, at no point did corrective manoeuvres lead the car into the opposite lane. Hence, whatever the speed and magnitude of steering wheel corrections, the vehicle was brought back close to the lane centre with no significant overshoot toward the opposite lane.

Lateral excursions were shorter in straight lines because it is easier and quicker to return to a safe position in these cases (Table 7 and Figure 22). So, no comparison between bends and straight lines was performed.

Table 7 - Analyses performed on bends and straight lines.

Summary of the statistical analyses performed on the effects of all devices for bends (grey rows) and straight lines (white rows). For each dependent variable and each comparison, the table shows the observed effect (d), the Bayesian conclusion on the size of the population effect (δ) with a guarantee of .90, the test statistics of the null hypothesis, and the two-tailed level of significance. Formalism used for comparisons: A: Assistance (a1: without assistance; a2: light MP, a3: strong MP); R: Risk expectation; A.R stands for the interaction between A and R; a1,a2 for a1 vs. a2.

Variable	Geometry	Comparison	<i>d</i>	Bayesian conclusion	Test	LoS
DLE: Duration of Lateral Excursion (s)	Bends	A.R			<i>F</i> (2,24)=0.75	<i>P</i> >.48
		A			<i>F</i> (2,24)=29.04	<i>P</i><.0001
		a1,a2	0.11	δ <0.23	<i>t</i> (12)=1.48	<i>P</i> >.16
		a1,a3	0.57	δ >0.43	<i>t</i> (12)=5.73	<i>P</i><.0001
	R	0.14	δ >0.08	<i>t</i> (12)=3.31	<i>P</i><.007	
	Straight lines	A.R			<i>F</i> (2,24)=0.07	<i>P</i> >.92
		A			<i>F</i> (2,24)=20.50	<i>P</i><.0001
		a1,a2	0.13	δ <0.23	<i>t</i> (12)=1.98	<i>P</i> <.08
a1,a3		0.46	δ >0.33	<i>t</i> (12)=5.07	<i>P</i><.0001	
R	0.13	δ >0.05	<i>t</i> (12)=2.43	<i>P</i><.04		
SRT: Steering Reaction Time (ms)	Bends	A.R			<i>F</i> (2,24)=1.43	<i>P</i> >.25
		A			<i>F</i> (2,24)=29.41	<i>P</i><.0001
		a1,a2	54	δ >36	<i>t</i> (12)=4.18	<i>P</i><.002
		a1,a3	83	δ >65	<i>t</i> (12)=6.67	<i>P</i><.0001
		a2,a3	29	δ >20	<i>t</i> (12)=4.52	<i>P</i><.0001
		R	06	δ <13	<i>t</i> (12)=1.06	<i>P</i> >.30
	Straight lines	A.R			<i>F</i> (2,24)=0.12	<i>P</i> >.88
		A			<i>F</i> (2,24)=8.68	<i>P</i><.002
		a1,a2	42	δ >28	<i>t</i> (12)=4.21	<i>P</i><.002
		a1,a3	40	δ >20	<i>t</i> (12)=2.74	<i>P</i><.02
a2,a3	02	δ <02	<i>t</i> (12)=0.24	<i>P</i> >.41		
R	07	δ <14	<i>t</i> (12)=1.58	<i>P</i> >.13		
SWRS: Steering Wheel Rotation Speed (°/s)	Bends	A.R			<i>F</i> (2,24)=1.55	<i>P</i> >.23
		A			<i>F</i> (2,24)=40.20	<i>P</i><.0001
		a1,a2	57	δ <77	<i>t</i> (12)=4.17	<i>P</i><.002
		a1,a3	134	δ >114	<i>t</i> (12)=9.59	<i>P</i><.0001
		R	38	δ >20	<i>t</i> (12)=3	<i>P</i><.02
	Straight lines	A.R			<i>F</i> (2,24)=1.47	<i>P</i> >.24
		A			<i>F</i> (2,24)=61.19	<i>P</i><.0001
		a1,a2	82	δ <99	<i>t</i> (12)=6.33	<i>P</i><.0001
a1,a3	160	δ >138	<i>t</i> (12)=10.29	<i>P</i><.0001		
R	24	δ >13	<i>t</i> (12)=3.18	<i>P</i><.009		
MASW: Maximum Angle of Steering Wheel (°)	Bends	A.R			<i>F</i> (2,24)=0.21	<i>P</i> >.81
		A			<i>F</i> (2,24)=36.70	<i>P</i><.0001
		a1,a2	10	δ >6	<i>t</i> (12)=3.89	<i>P</i><.003
		a1,a3	24	δ >19	<i>t</i> (12)=7.69	<i>P</i><.0001
		a2,a3	13	δ >10	<i>t</i> (12)= 6.68	<i>P</i><.0001
		R	14	δ >6	<i>t</i> (12)=3.77	<i>P</i><.003
	Straight lines	A.R			<i>F</i> (2,24)=0.54	<i>P</i> >.58
		A			<i>F</i> (2,24)=70.60	<i>P</i><.0001
		a1,a2	9	δ >6	<i>t</i> (12)=5.70	<i>P</i><.0001
		a1,a3	20	δ >17	<i>t</i> (12)=9.82	<i>P</i><.0001
a2,a3	11	δ >9	<i>t</i> (12)= 8.00	<i>P</i><.0001		
R	2	δ <4	<i>t</i> (12)=1.45	<i>P</i> >.17		

6.4.1 Duration of Lateral Excursion (DLE)

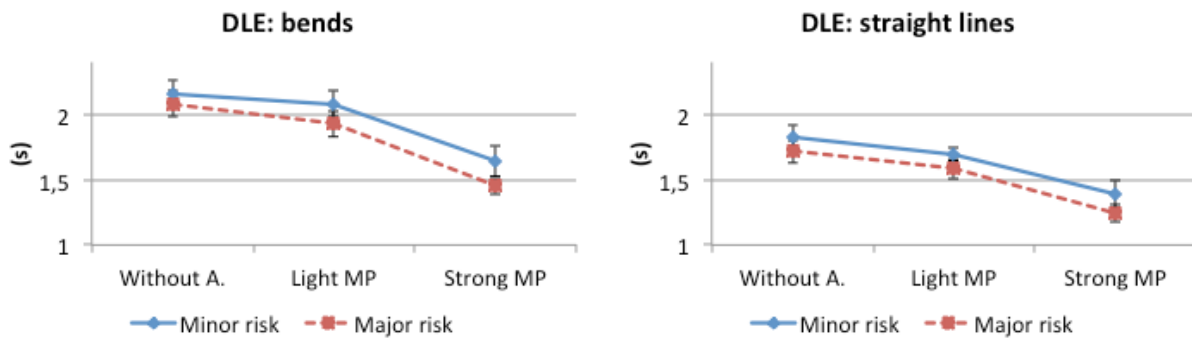


Figure. 22. Duration of Lateral Excursion (DLE) in bends (left) and in straight lines (right) as a function of risk expectation. Without: Without assistance; Light: light MP; Strong: strong MP. Error bars represent standard errors of means.

The DLE without assistance and with a minor risk was, on average, 2.16 s in bends and 1.83 s in straight lines. The device (A) and risk expectation (R) had significant effects in bends or in straight lines, without significant interaction (Table 7 and Figure 22).

In bends, the effect of strong MP was greater ($\delta > 0.43$ s) than the effect of light MP ($|\delta| < 0.23$ s). Risk expectation also reduced the DLE by about 0.14 s. In the major risk condition, drivers were quicker to return toward a safe position than in the minor risk condition ($\delta > 0.08$ s).

In straight lines, the effect of strong MP ($\delta > 0.33$ s) was greater than the effect of light MP ($|\delta| < 0.23$ s). In the major risk condition, drivers were quicker to return toward a safe position than in the minor risk condition ($\delta > 0.05$ s).

Thus, light and strong MP reduced the DLE in bends and in straight lines. Strong MP was more efficient than light MP. Moreover, the manipulation of risk expectation by means of instructions had a systematic effect on DLE in bends and in straight lines.

6.4.2 Steering Reaction Time (SRT)

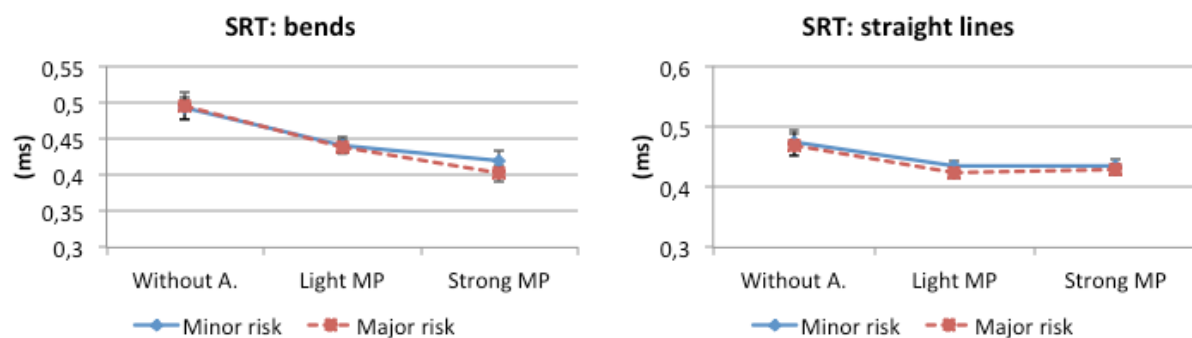


Figure. 23. Steering reaction times (SRT) in bends (left) and in straight lines (right) as a function of risk expectation. Without: Without assistance; Light: light MP; Strong: strong MP. Error bars represent standard errors of means.

The SRT without assistance and with a minor risk was, on average, 492 ms in bends and 473 ms in straight lines. The device, but not risk expectation, had a significant effect in bends or in straight lines, without significant interaction (Table 7 and Figure 23).

In bends, the effect of light MP ($\delta > 36$ ms) and strong MP ($\delta > 65$ ms) were notable and significant when compared to the control condition, with a significant difference between them ($\delta > 20$ ms). The effect of risk was negligible ($|\delta| < 13$ ms).

In straight lines, the device notably reduced the SRT (Light MP: $\delta > 28$ ms; strong MP: $\delta > 20$ ms), with no significant difference between them ($|\delta| < 02$ ms). As for bends, the effect of risk was negligible ($|\delta| < 14$ ms).

In sum, MP reduced SRT in bends and in straight lines, with no effect of risk expectation.

6.4.3 Peak of Steering Wheel Rotation Speed (SWRS)

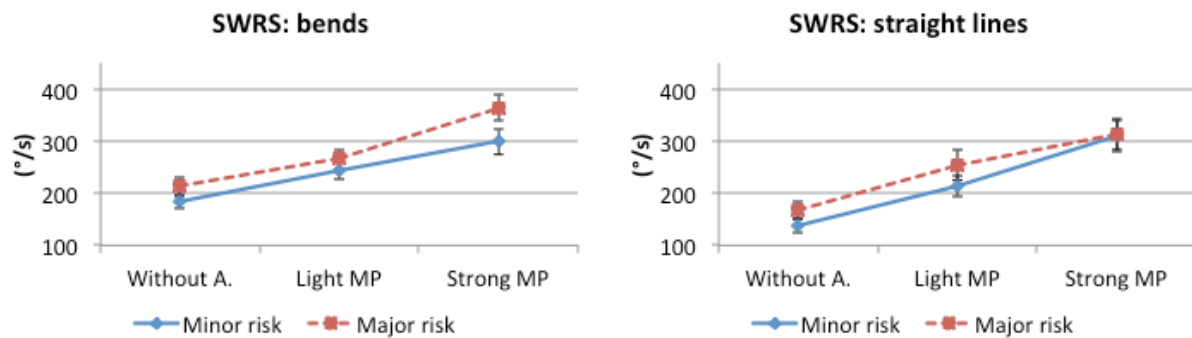


Figure. 24. Peak of Steering Wheel Rotation Speed (SWRS) in bends (left) and in straight lines (right) as a function of risk expectation. Without: Without assistance; Light: light MP; Strong: strong MP. Error bars represent standard errors of means.

The SWRS without assistance and with a minor risk was, on average, $183^\circ/\text{s}$ in bends and $138^\circ/\text{s}$ in straight lines. The device and risk expectation had significant effects in bends or in straight lines, without significant interaction (Table 7 and Figure 24).

In bends, the effect of strong MP was greater ($\delta > 114^\circ/\text{s}$) than the effect of light MP ($|\delta| < 77^\circ/\text{s}$). Risk expectation also increased the rotation speed of the steering wheel by about $38^\circ/\text{s}$ ($\delta > 20^\circ/\text{s}$).

In straight lines, the effect of strong MP was greater ($\delta > 138^\circ/\text{s}$) than the effect of light MP ($\delta < 99^\circ/\text{s}$). In the major risk condition, drivers rotated their steering wheel more quickly ($\delta > 13^\circ/\text{s}$) than in the minor risk condition.

Thus, MP increased SWRS in all cases, with an effect of MP strength; the stronger the MP, the higher the SWRS. Moreover, the manipulation of risk expectation by means of instructions had a systematic effect on SWRS in all cases.

6.4.4 Steering Wheel Maximum Angle (SWMA)

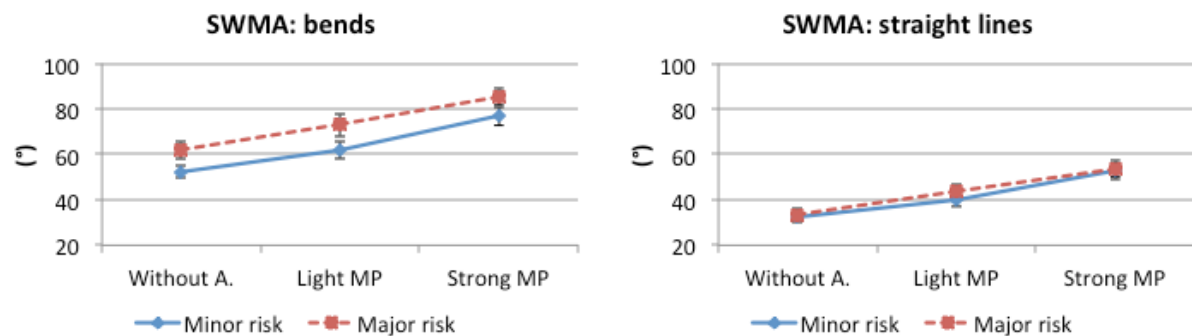


Figure. 25. Steering Wheel Maximum Angle (SWMA) in bends (left) and in straight lines

(right) as a function of risk expectation. Without: Without assistance; Light: light MP; Strong: strong MP. Error bars represent standard errors of means.

The mean SWMA in conditions without assistance and with a minor risk was, on average, 52° in bends and 32° in straight lines. The device had significant effects in bends or in straight lines, without significant interaction (Table 7 and Figure 25).

In bends, the effect of light MP ($\delta > 6^\circ$) and strong MP ($\delta > 19^\circ$) were notable, with a significant difference between them ($\delta > 10^\circ$). Risk expectation also increased the SWMA by about 14° and had a significant effect. In the major risk condition, drivers adopted a higher angle on the steering wheel than in the minor risk condition ($\delta > 6^\circ$).

In straight lines, the effect of light MP ($\delta > 6^\circ$) and strong MP ($\delta > 17^\circ$) were notable, with a significant difference between them ($\delta > 9^\circ$). The effect of risk was not significant and negligible ($|\delta| < 4^\circ$).

Thus, MP increased SWMA in all cases. The manipulation of risk expectation by means of instructions had a systematic effect on SWMA in bends, but not in straight lines.

6.5 Discussion

This experiment investigated the combined influence of risk expectation and MP, an assistance device delivering directional haptic cues on the steering wheel during lane departure episodes. Navarro *et al.* (2007, 2010) examined the same assistance device, comparing the effect it had on recovery manoeuvres with those elicited by various lane departure warning systems, including lateralised vibration on the steering wheel (that is directional tactile stimulation of the hands). Navarro's results strongly suggested that MP directly intervenes at the level of sensorimotor control by cueing the motor system; this contrasts with warning systems, which only improve situation diagnosis. The main issue in the present experiment was to determine whether the sensorimotor component of the stimulation left drivers in full (symbolic) control of their reactions. To this end, risk expectation was manipulated. Results show that MP effectively improved lateral control. This was observed on all steering indicators, from response times to the duration of lateral excursion. The stronger MP was, the greater its effects. Risk expectation also had a systematic effect on all indicators, with the exception of reaction times; this emphasises the modulation of the steering response by symbolic processes. The following discussion will examine in detail the respective influence of symbolic and subsymbolic processes in those results.

6.5.1 Risk analysis

When MP intervened, drivers were quicker to react. The haptic cue delivered by MP gave directional information to the arm motor system, which reduced response times by a similar amount whatever the level of risk expectation. It suggests that the initiation of the steering response was determined at the subsymbolic level. The influence of risk expectation appeared later during the response execution. Drivers rotated their steering wheel faster, reached a larger maximum steering angle and reduced the duration of lateral excursion when the expected risk was higher. Thus, it appears that drivers took into consideration the hazardousness of the situation to modulate their corrective manoeuvres once it was initiated.

Interestingly, there was one exception to the previous statement. Risk expectation increased the maximum steering wheel angle in bends, but not in straight lines. This could be linked to the fact that lateral excursions were smaller in straight lines than in bends because of road geometry. As a consequence, lateral excursions were probably judged as less risky. It can be hypothesised that the drivers not only took into consideration the expected risk, as it was

manipulated by instruction, but also the “real” risk of the situation. In straight lines, drivers were influenced by risk instructions and, as a consequence, increased their steering wheel rotation speed in the major risk condition. Since it was enough to bring the car back into a safe position, they had no further need to perform a larger corrective manoeuvre (as indicated by the maximum angle of the steering wheel). Furthermore, a larger corrective manoeuvre would have probably led to overshooting the targeted final position, which may even have led to an excursion into the opposite lane. So, this result may be considered as another demonstration that the drivers performed a global diagnosis of the situation, which further influenced the execution of the manoeuvre. Figure 26 illustrates these results, along with the current discussion.

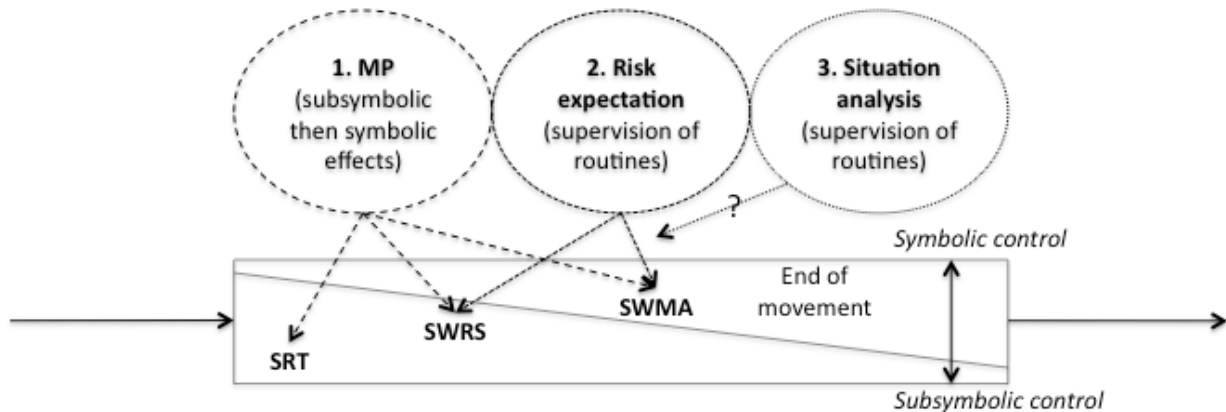


Figure. 26. Illustration of results. MP has an effect on SRT (reduction), SWRS (increase) and SWMA (increase). Risk expectation has an effect on SWRS (increase) and SWMA (increase for bends only). Situation analysis seemed to modulate the effect of risk expectation on SWMA. These effects produced a reduction of the DLE in bends and in straight lines. The global pattern of results suggests that the initiation of movement was determined by subsymbolic control and that the influence of symbolic control by means of supervision of routines progressively increased during the corrective manoeuvre.

6.5.2 Role of the supervision process

In summary, most executions of the corrective manoeuvres were, at least partially, under the influence of supervisory processes. The influence of risk expectation was observed on steering wheel rotation speed, which was always computed during the 450 ms that followed the recording of steering reaction time. Considering that reaction times were roughly between 300 and 500 ms, it means that the influence of symbolic processes operated around 750 ms after the assistance entered into action. Thus, drivers quickly took elements of the driving context into consideration to modulate the strength of their corrective manoeuvres.

The rationale behind the manipulation of MP strength was that a stronger input to the motor system may not facilitate the execution of the response in the direction indicated by the cue. On the contrary, it may elicit a reflexive counteraction, prompting the participants to turn the steering wheel in the wrong direction. Kullack *et al.* (2008) underlined this possibility and even proposed an assistance device, known as ReflektAS, based on this principle. The idea is that a sudden jerk of the steering wheel may tap into basic reflex circuitry, producing automatic and fast responses. Although strong MP was three times higher than light MP, our results do not show any indication that such behaviour occurred. Actually, the reduction of reaction times reported by Kullack *et al.* (2008) was replicated, but the steering response was always in the direction of the stimulation, whatever its strength. Beyond SRT, the results

show that stronger MP increased SWRS and SWMA, which yielded a reduction of the DLE. This suggests that a stronger MP can improve recovery manoeuvres even better than mild motor cuing. However, Navarro *et al.* (2010) pointed out that the acceptance of an MP-based system may be impaired if the system is judged to be too intrusive. Thus, any design goals should look to achieve a system that facilitates the corrective gesture without being perceived as too intrusive in terms of vehicle control.

6.5.3 Limitations of the study

Finally, potential limitations of our study should be addressed. A first possible issue is about the visual occlusion method. Visual occlusions allowed a high control of the timing and positioning of lane departure events; this was essential for assessing the effects of driving assistance and risk expectation independently of any contextual factors. However, it could be argued that the ecological validity of this method is weak and that other methods exist, such as the manipulation of lane width and density of traffic (Dijksterhuis *et al.* 2011) or distraction by means of a secondary task (Navarro *et al.* 2010). A replication with one of these methods would help to determine the extent to which the present results could be generalized. Furthermore, future studies should investigate how the effects of MP could be translated to other types of critical situations. Slippery roads, for instance, may pose a challenge. In that case, the MP cue would interact with strong modifications of steering wheel force feedback due to adherence loss.

The use of a fixed-base simulator to investigate steering responses in critical situations may also be discussed. Although the IRCCyN simulator renders very realistic steering wheel force-feedback through a real-car active steering system and advanced vehicle models, no inertial cues were present. A recent study compared loss of adherence situations in static (IRCCyN) and dynamic (Renault Ultimate) driving simulators (Denoual *et al.* 2011). The results highlighted the role of non-visual information on the subjective perception of loss of adherence, with steering wheel haptic cues predominating for the static simulator and motion platform predominating for the dynamic simulator. In both cases, the execution of the corrective response was quite similar.

Finally, subjects were instructed to keep both hands on the steering wheel and maintain the standard “10-to-2” position; in real life, however, many different hand positions can be observed. Further investigation should study how the benefits of MP could be generalized to other ways of holding the steering wheel. The benefits of a repetitive haptic cue that lasts for a period of one second, as in the present study, should also be compared with a simple jerk of the steering wheel.

Lastly, whatever the instructions given in this experiment, drivers were not really in a risky situation. It could be hypothesised that any effects of risk expectation would be greater within real driving conditions.

6.6 Conclusion

Several conclusions can be drawn from this experiment. First, our results support the hypothesis proposed by Navarro *et al.* (2007, 2010), according to which MP intervenes at a motor level, proprioceptively pre-activating the corrective gesture. Navarro and colleagues reached this conclusion on the basis of the comparison between MP and various types of lane departure warning systems. Here, another approach was chosen. We showed that reaction times were influenced by the variation of the strength of the motor cue, not by risk expectation that was induced by symbolic information. This supports the idea that the initiation of the steering response is produced at a subsymbolic level only and that MP

intervenes at this level. However, it was also proven that drivers can modulate their response very early during the execution of the corrective manoeuvres in accordance with the level of perceived hazard. Beyond the question of modulation, the question of the inhibition of MP effects should also be considered in future studies (Prochazka *et al.* 2000). This corresponds to the ability of drivers to fully inhibit the effects when they disagree with the suggested corrective manoeuvre.

Finally, the present paper focuses on MP devices. However, the supervision of other types of systems that are designed to blend into the driver's sensorimotor control loop may pose very similar issues. This is particularly the case with automation based on shared control of the steering wheel (Griffiths and Gillespie 2005).

ACKNOWLEDGEMENT

This research has been supported by ANR (Agence National pour la recherche), VTT program, PARTAGE project (n° 0866C0222).

6.7 References

- Abbink, D.A., Mulder, M., & Boer, R.E. (2011). Haptic shared control: smoothly shifting control authority? *Cognition Technology & Work*, 1, 19-28.
- Anderson, J.R., Bothell, D., Byrne, M.D., Douglass, S., Lebiere, C., & Quin, Y.L. (2004). An integrated theory of the mind. *Psychological Review*, 111, 1036-1060.
- Baldwin, C., L. (2011). Verbal collision avoidance messages during simulated driving perceived urgency, alerting effectiveness and annoyance. *Ergonomics*, 54, 328-337.
- Brookhuis, K., A., de Waard, D., & Fairclough, S., H. (2003). Criteria for driver impairment, *Ergonomics*, 46, 433-445.
- Coutton-Jean, C., Mestre, D.R., Goulon, C., & Bootsma, R.J. (2009). The role of edge lines in curve driving. *Transportation Research Part F*, 12, 483-493.
- Denoual, T., Mars, F., Petiot, J.F., Reymond, G., & Kemeny A. (2011). Drivers' perception of loss of adherence in bends: influence of motion rendering. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 11, 041004 (7 pages). Available from: <http://dx.doi.org/10.1115/1.3622752> [Accessed 11 October 2011]
- Dijksterhuis, C., Brookhuis, K.A., & De Waard D. (2011). Effects of steering demand on lane keeping behaviour, self-reports, and physiology. A simulator study. *Accident Analysis and Prevention*, 43, 1074-1081.
- Godthelp, H., Milgram, P., & Blaauw, G. J. (1984). The Development of a Time-Related Measure to Describe Driving Strategy. *Human Factors*, 26, 257-268.
- Griffiths, P.G., & Gillespie, R.B. (2005). Sharing Control Between Humans and Automation Using Haptic Interface: Primary and Secondary Task Performance Benefits. *Human Factors*, 47, 574-590.
- Ho, C., Tan, H., Z., & Spence, C. (2006): The differential effect of vibrotactile and auditory cues on visual spatial attention, *Ergonomics*, 49, 724-738
- Hoc, J.M. (1996). *Supervision et contrôle de processus: la cognition en situation dynamique*. Grenoble, F: Presses Universitaires de Grenoble.
- Hoc, J.M., Young, M.S., & Blosseville, J. M. (2009). Cooperation between drivers and automation: implications for safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10, 135-160.

- Hoc, J.M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive Control Dynamics for Reaching a Satisficing Performance in Complex Dynamic Situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1, 22-55.
- Jonah, B.A. (1997). Sensation seeking and risky driving: a review and synthesis of the literature. *Accident Analysis & Prevention*, 29, 651-665.
- Kullack, A., Ehrenpfordt, I., Lemmer, K., & Eggert, F. (2008). ReflektAS: lane departure prevention system based on behavioural control. *IET Intelligent Transport Systems*, 2, 285-293.
- Lechner D., Delanne Y., Schaefer G., & Schmitt V. (1997). *Méthodologie de validation du logiciel de dynamique automobile CALLAS*. SIA 970202. Congrès SIA Lyon, Avril 1997. Reprinted in *Ingénieurs de l’automobile* N°713, May 1997.
- Lecoutre, B., & Poitevineau, J. (2005). Le logiciel “LePAC”. *La Revue de Modulad*, 33 (whole volume). Available from: <http://www.univ-rouen.fr/LMRS/Persopage/Lecoutre/PubBL.html> [Accessed 03 Mars 2011]
- Lewis-Evans, B. & Charlton, S. G. (2006). Explicit and implicit processes in behavioural adaptation to road width. *Accident Analysis & Prevention*, 38, 610-617.
- Mars, F. (2008). Driving around bends with manipulated eye steering coordination. *Journal of Vision*, 8, Article 10, 1-11. Available from: <http://jwww.journalofvision.org/content/8/11/10.full> [Accessed 24 February 2011]
- Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models. What do we know, what should we do? In L. Evans and R. Schwing (Eds.), *Human behavior and traffic safety* (pp. 485-525). New York: Plenum press.
- Michon, J.A. (1979). Dealing with danger. In: *Report of the European Commission, MRC Workshop on Physiological and psychological performance under hazardous conditions*. Gieten, The Netherlands, 23–25 May, 1978, *Report VK 79-01*, Traffic Research Center, University of Groningen.
- Najm, W. G., Smith, J. D., & Yanagisawa, M. (2007). *Pre-crash scenario typology for crash avoidance research*. (Tech. Rep. DOT-HS-810 767). Washington, DC: National Highway Transportation Safety Administration Research.
- Navarro, J., Mars, F., & Hoc, J. M. (2007). Lateral control assistance for car drivers: a comparison of motor priming and warning systems. *Human Factors*, 49, 950-960.
- Navarro, J., Mars, F., Forzy, J., El-Jaafari, M., & Hoc, J. (2010). Objective and subjective evaluation of motor priming and warning systems applied to lateral control assistance. *Accident Analysis & Prevention*, 42, 904-912.
- Navarro, J., Mars, F., & Young, M.S. (2011). Lateral control assistance in car driving: classification, review and future prospects. *IET Intelligent Transport Systems*, 5, 207-220.
- Parasuraman, R., Sheridan, T., & Wickens, C. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 30, 286-297.
- Prochazka, A., Clarac, F., Loeb, G.E., Rothwell, J.C., & Wolpaw, J.R. (2000). What do reflex and voluntary mean? Modern views on an ancient debate. *Experimental Brain Research*, 130, 417-432.

- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction*. Amsterdam: Elsevier.
- Rouanet, H. (1996). Bayesian methods for assessing importance of effects. *Psychological Bulletin*, 119, 149–158.
- Rouanet, H., & Lecoutre, B. (1983). Specific inference in ANOVA: from significance tests to Bayesian procedures. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 36 (NOV), 252–268.
- Stanley, L.M. (2006) *Haptic and auditory interfaces as collision avoidance technique during roadway departures and driver perception of these modalities*. Doctoral dissertation, Montana state university, Montana.
- Suzuki, K., & Jansson, H. (2003). An analysis of driver’s steering behaviour during auditory or haptic warnings for the designing of lane departure warning system. *Japan Society of Automotive Engineers Review*, 24, 65-70.
- van der Horst., R. (2004). Occlusion as a measure for visual workload: an overview of TNO occlusion research in car driving. *Applied Ergonomics*, 35, 189-196.

Chapitre 7 - Analyse de la coopération homme-machine en fonction du degré de contrôle partagé du volant

« La perte de l'ignorance est parfois dangereuse, car l'ignorance est un bouclier. »

La chute d'Hypérion, 1992, **Dan Simmons**

SOMMAIRE

- 7.1 Résumé étendu en français
 - 7.2 Introduction
 - 7.3 Method
 - 7.4 Results
 - 7.5 Discussion
 - 7.6 Conclusion
 - 7.7 References
-

7.1 Résumé étendu en français

Cet article est soumis dans une revue internationale à comité de lecture. Un résumé étendu en français est proposé afin d'introduire l'article qui est reproduit dans son intégralité en anglais.

7.1.1 Objectif de l'étude

Nous venons de voir, dans les deux chapitres précédents, comment les conducteurs régulent les effets d'un amorçage haptique. Lorsque l'intervention est continue, et que la trajectoire est modifiée par le dispositif, nous changeons alors de mode de coopération. D'un mode de coopération de type contrôle mutuel nous passons à un mode de contrôle de type partagé. La première question qui survient lors de la conception d'un tel mode est la façon dont les

conducteurs vont intégrer l'intervention du dispositif dans leur activité de conduite. Toutefois, parler de contrôle partagé ne précise aucunement le degré de partage qui est envisagé. Or de ce degré de partage devrait dépendre l'intégration efficace, ou non, dans le contrôle sensori-moteur de la trajectoire. Cet article se propose donc d'analyser la coopération homme-machine en fonction du degré d'intervention alloué à la machine par le concepteur et de la capacité du conducteur à anticiper la courbure de la route. Plusieurs indicateurs comportementaux et subjectifs viendront étayer cette analyse. Enfin, cet article a été conçu comme étant une première étape afin de pouvoir choisir un réglage optimal de contrôle partagé avant d'en étudier les effets à plus long terme (ce qui sera l'objet du prochain chapitre).

7.1.2 Introduction

L'assistance étudiée est appelée contrôle partagé, ou « *shared control* » dans la littérature (Abbink, Mulder & Boer, 2011; Griffith & Gillespie, 2005). Le contrôle partagé est un mode de coopération homme-machine au sens de Hoc, Young et Blosseville (2009) : deux agents, un conducteur et un automate, interfèrent (positivement ou négativement) dans la réalisation d'une tâche. Le contrôle partagé présente deux caractéristiques essentielles (De Winter & Dodou, 2011). La première est *l'action commune des deux agents sur la même variable*. La seconde est que *l'action sur cette variable s'effectue à partir du même dispositif de commande*. Dans le cas présent nous étudions un contrôle partagé à partir du volant (le dispositif de commande) afin de produire une action simultanée sur la position latérale (la variable). L'action commune signifie, *in fine*, que l'automate n'est pas conçu pour agir seul sur la trajectoire. Son action est limitée et seul un pourcentage de l'intervention qu'elle a calculé comme étant nécessaire est appliqué sur le volant.

Les conducteurs reçoivent donc, en plus, un feed-back en continu des actions de l'automate puisque ce dernier agit par l'intermédiaire du volant. En conséquence un guidage haptique découle des deux précédentes caractéristiques. Ce guidage est censé faciliter la tâche de maintien dans la voie.

Une question centrale émerge de cette définition du contrôle partagé. Quel type de coopération sera réellement réalisé par le conducteur ? Concevoir un dispositif de contrôle partagé ne détermine pas de quelle façon le partage s'opèrera. Deux facteurs peuvent jouer dans la répartition effective de la tâche.

Le premier facteur est le degré de partage dévolu au dispositif par le concepteur. Nous avons précédemment décrit le contrôle partagé comme l'application d'un pourcentage de l'intervention calculé comme étant nécessaire. Ce pourcentage est rarement défini dans la littérature (Abbink, Mulder & Boer, 2011), car très dépendant de la loi de commande utilisée, mais ce pourcentage est pourtant essentiel pour comprendre et interpréter les résultats issus de l'analyse d'une situation de contrôle partagé. Nous pourrions en effet émettre l'hypothèse qu'un pourcentage élevé inciterait les conducteurs à déléguer la tâche de guidage plutôt que de la partager avec l'automate.

Le second facteur pouvant influencer le type de coopération réalisée par le conducteur est lié à la capacité à anticiper la courbure de la route. Dans l'hypothèse où le conducteur est limité dans sa capacité à anticiper il n'est pas à exclure davantage d'efficacité du système homme-machine si le conducteur laisse davantage faire la machine.

Enfin, en lien avec le degré de partage dévolu à la machine il nous semble important d'étudier l'effet que le pourcentage d'intervention du contrôle partagé a sur l'exigence visuelle. Nous savons que le contrôle partagé réduit cette exigence (Griffith & Gillespie, 2005), mais nous ne savons pas si cette réduction est similaire quel que soit le réglage du dispositif.

Pour conclure cette introduction, la présente étude s'intéresse donc à la coopération homme-machine, dans le sens de la répartition de la fonction de maintien dans la voie et de la gestion des interférences entre conducteur et automate. Nous allons étudier cette coopération en faisant varier le degré d'intervention du dispositif (pourcentage) ainsi que la capacité d'anticipation des conducteurs. Enfin, des données sur l'exigence visuelle ainsi que des données subjectives recueillies par questionnaires viendront compléter l'analyse de ces situations.

7.1.3 Méthode

Dans cette étude menée sur simulateur de conduite, 21 conducteurs ont été confrontés à 6 types de conduite différents (facteur assistance), une situation sans assistances (SC00) et 5 réglages du contrôle partagé, respectivement appelés SC01, SC11, SC21, SC31 et SC100 en référence au pourcentage d'intervention appliqué sur la loi de commande. Plus le pourcentage est important et moins l'assistance ne tolérera d'écart au centre de la voie. Avec chaque condition du facteur assistance les conducteurs réalisaient 3 tours de circuit différents. Un premier tour correspondait à une situation nominale de « bonne visibilité ». Un deuxième tour en condition « brouillard » permettait de manipuler la capacité à anticiper des conducteurs. Ces deux tours correspondent au facteur visibilité. Enfin, un dernier tour d'« exigence visuelle » demandait aux conducteurs de conduire sans visibilité. Chaque appui sur les appels de phare permettait d'afficher la scène visuelle durant 1 seconde. Cette condition expérimentale nous permettait de mesurer l'exigence visuelle liée à chaque modalité du facteur assistance.

L'assistance agissant en continu, au contraire des deux précédents chapitres expérimentaux, nous avons pris des mesure pour chacun des tours de circuit. Nous avons alors analysé le contrôle du volant par la fréquence d'inversion du sens de rotation du volant et l'effort physique par l'énergie requise pour maintenir le volant dans la voie durant un tour de circuit. Nous avons également analysé la trajectoire en mesurant d'une part la tendance à couper les virages par la position moyenne dans le virage et d'autre part la variabilité de l'écart latéral.

Enfin, nous avons enregistré la fréquence de demande d'informations visuelles durant le scénario exigence visuelle. Pour terminer nous avons recueilli par questionnaire quelques données subjectives à propos du confort, du sentiment de sécurité, du sentiment de maîtrise de la situation et d'évaluation de l'exigence visuelle (échelle analogique allant de 0 à 10).

7.1.4 Résultats

L'ANOVA effectuée sur la fréquence d'inversion du volant révèle un effet d'interaction entre le facteur assistance et le facteur visibilité. L'effet de la visibilité est plus important lorsqu'il n'y a pas d'assistance ou un réglage léger ($\delta > 0.15$ Hz pour SC00, SC01 et SC11) que lorsque le réglage est puissant ($|\delta| < 0.11$ Hz pour SC21, SC31 et SC100). Une réduction de l'effort physique est notée avec les réglages SC11, SC21 et SC31 ($p = 0.0001$). A l'inverse, cet effort est augmenté avec SC100 ($p = 0.0014$).

En termes de trajectoire nous analysons tout d'abord la tendance à redresser les virages. Il n'y a pas d'effet significatif des réglages SC11 et SC31 ($p = 0.5371$) en comparaison avec sans assistance. A l'inverse, alors que les réglages les plus puissants sont conçus pour ramener au centre de la voie, les conducteurs redressent davantage les virages, donc s'éloignent davantage de ce centre de la voie ($\delta > 7.6$ cm). De plus, la mauvaise visibilité réduit la tendance à redresser les virages, quelle que soit la modalité du facteur assistance ($p = 0.0064$). Lorsque nous regardons la variabilité de l'écart latéral nous observons une diminution de cette variabilité dès le réglage SC11 ($\delta > 9.47$ cm). Enfin, la visibilité a des effets significatifs avec

toutes les modalités du facteur assistance, à l'exception du réglage SC11 ($p=0.6865$) et du réglage SC100 ($p=0.9896$).

Comme il était annoncé dans la littérature, le contrôle partagé réduit l'exigence visuelle. Par contre, il n'y a pas de différence entre les différentes modalités du contrôle partagé (à l'exception de SC01, qui n'était presque pas ressentie par les conducteurs et ne peut sans doute pas être considérée comme un contrôle partagé).

Pour terminer, les données subjectives recueillies par questionnaire éclairent les précédents résultats obtenus. Nous avons réuni les items du questionnaire deux à deux en fonction des patterns de réponse obtenus. Les sentiments de confort et de maîtrise de la situation présentent des résultats à peu près similaires entre SC01, SC11 et SC21. Une baisse significative du niveau des évaluations est par contre constaté avec les réglages SC31 et SC100 par comparaison avec SC01, SC11 et SC21 ($\delta > 1.2$ pour le confort et $\delta > 2.1$ pour le contrôle de la situation). A l'inverse, pour les items sécurité et exigence visuelle seul SC01 est moins bien évalué ($\delta > 1.2$ pour la sécurité et $\delta > 1.9$ pour l'exigence visuelle).

Il ressort donc de ces données que les réglages SC11 et SC21 sont les mieux évalués, lorsque nous prenons en compte les quatre dimensions du questionnaire.

7.1.5 Discussion et conclusion

L'objectif de cet article est d'investiguer comment différents degrés de contrôle partagés s'intègrent dans les boucles de contrôle sensori-moteur. Dans ce papier, en plus du pourcentage d'intervention appliqué sur la loi de commande, nous intégrons dans l'analyse la capacité des conducteurs à anticiper convenablement la trajectoire.

En résumé, les effets du contrôle partagé dépendent de ces deux facteurs. En termes de contrôle sensori-moteur il existe une rupture nette entre SC21 et SC31. Avec les contrôles partagés de réglage intermédiaire (SC11 et SC21) le conducteur conserve le contrôle de sa trajectoire tout en bénéficiant du soutien de l'assistance. D'une certaine façon c'est un réel partage de la fonction de maintien dans la voie qui est opéré et ce partage est fluctuant dans le contexte (capacité du conducteur à anticiper la courbure de la route).

A l'inverse, des partages trop importants en faveur de la machine conduisent à des interférences négatives entre conducteurs et automate. De façon surprenante, les conducteurs redressent davantage les virages avec les contrôles les plus puissants, qui auraient tendance à conduire au centre de la voie sans l'intervention du conducteur. Cela signifie que plutôt que de produire une trajectoire intermédiaire entre celle de l'humain seul et celle de la machine seule, les conducteurs anticipent d'une certaine façon l'action du dispositif et entrent en interférence négative avec lui pour être certains de produire une trajectoire acceptable, qu'ils peuvent juger comme étant acceptable.

La diminution de la capacité à anticiper la trajectoire conduit les conducteurs à modifier leur trajectoire de conduite sans assistance (diminution du redressement des virages et de la variabilité de l'écart latéral). Avec le contrôle partagé, seuls les réglages intermédiaires (SC11 et SC21) permettent cet ajustement. Nous observons également un rôle plus important de la machine dans le contrôle de la trajectoire (diminution de l'effort physique). La visibilité a, par contre, produit beaucoup moins d'effet avec SC100. Quelle que soit la visibilité, les conducteurs ont tenté de conserver le contrôle, quitte à produire une trajectoire encore plus dangereuse que sans assistance (redressement des virages sans visibilité avec SC100).

Il est également intéressant de constater que la diminution de l'exigence visuelle est identique quel que soit le degré de contrôle partagé. Cela s'explique certainement par le fait que les conducteurs n'ont pas coopéré de la même façon avec les réglages intermédiaires et avec les

réglages les plus puissants. Avec les réglages intermédiaires ils ont délégué une partie de la fonction alors qu'avec les réglages les plus puissants ils se sont opposés au dispositif.

Ces résultats nous mènent vers la discussion de l'autorité. Cette étude n'a pas étudié spécifiquement cette question de l'autorité mais nous pensons, en effet, que les résultats obtenus ainsi que la conception même du contrôle partagé doit interroger les chercheurs et les concepteurs sur cette question. De Winter et Dodou (2011) résument l'incertitude liée au contrôle partagé par ces trois questions : Qui contrôle ? Qui agit ? Dans quelle proportion ?

Il est possible que les résultats que nous observions soient en effet liés à la façon dont la tâche, et donc d'une certaine façon l'autorité, a été présentée aux conducteurs. Dans toutes les situations, excepté celle sans assistance, il est indiqué au conducteur qu'il allait conduire avec une assistance ne réalisant que partiellement le contrôle de la trajectoire. La variation du degré de partage n'était pas associée, pour les sujets, avec une variation du degré de l'autorité. Pourtant, en ayant un pourcentage d'intervention plus élevé, la machine détenait davantage d'autorité, dans le sens de liberté d'agir à sa guise.

Nous pensons donc que la question de l'articulation entre contrôle et autorité devra être éclaircie dans les futures recherches sur le contrôle partagé et sur la coopération homme-machine en général.

Analysis of human-machine cooperation when driving with different degrees of shared control

Deroo M., Mars F., & Hoc J.M.

Abstract

Objective. The present paper presents an analysis of human-machine cooperation when driving with different degrees of shared control. **Background.** Shared control between drivers and steering automation aims to facilitate lane keeping in order to improve both safety and comfort. Based on a preview of road curvature, the assistance device partially corrects the vehicle's trajectory. Since the torque is applied on the steering wheel, it also provides haptic guidance to the driver. A crucial point is to determine the optimal level of steering assistance for effective cooperation between the driver and the automation device. **Method.** A simulator was used to investigate the effects of five degrees of shared control on the torque applied by the drivers on the steering wheel, trajectory profiles and various subjective indicators. In addition, the road scene visibility was manipulated (good visibility, fog, and visual demand). In the visual demand condition, a transient view (1s) of the road was available when the driver asked for it by pulling the wiper handle. **Results.** By cross-checking various indicators of lateral control we determined the best allocation of control between human and machine. Interestingly, the best allocation depends on the capacity of the driver to fully anticipate the trajectory. Moreover, drivers self-reported a greater sense of comfort and safety when they applied slightly more torque on the steering wheel. Higher degrees of shared control did not yield higher benefits in terms of the performance of the human-machine system. These results are discussed in relation to current approaches to human-machine cooperation. **Application.** The conclusion may be of interest to researchers of human-automation interaction and designers of haptics-based automation, such as lane keeping assistance systems.

Keywords: Shared Control; Haptic guidance; Human-Machine Cooperation; Level of Automation.

7.2 Introduction

Constant progress in the development of automation has led to the design of more and more advanced devices. In the field of aeronautics, there is a recurring debate about the difference between soft automation and hard automation (Young, Stanton & Harris, 2007). The main difference between soft and hard automation is the authority of the machine: with hard automation, the machine has the final word.

In driving, a wide variety of devices have been developed. These range from very soft automation (visual clues) to hard automation (full delegation) (Hoc, Young & Blosseville, 2009). Car driving is a much more complex dynamic situation than commercial aircraft piloting, because of greater traffic complexity and the number of unpredictable events. Thus, the use of hard automation in cars does not seem achievable in the near future. However, the idea of assisting the driver, without full delegation, is feasible. A new device is available that is increasingly being studied. Known as shared control, it sits somewhere in the middle of the soft-hard automation continuum. The idea is to join human and machine action in a simultaneous way, using the same task and the same interface. However, shared control does not define the degree of sharing that is best for performance and the driver's cost; nor does it define the optimal situation. Thus, this paper will present a method for choosing between different degrees of shared control.

7.2.1 What is shared control?

Shared control is a situation where the human and the machine simultaneously perform the same task using the same interface. Sheridan and Verplank (1978) distinguished between two forms of shared control: extension and relief. In the former, the machine helps the human to perform better than they could do alone. In the latter, the cost of the task is alleviated for the human. In fact, shared control explores a mix of both these aims, leading to better performance in terms of lane keeping and, for the driver, a decrease in the cost of driving (Griffiths & Gillespie, 2005; Abbink & Mulder, 2010).

Recently, de Winter and Dodou (2011) defined shared control when driving as the combination of four properties. First, the same control interface is shared simultaneously. Second, the action of the device, the delivery of torque, is continuous. Third, the device acts on the haptic modality. Finally, the controller remains unaffected. The authors stated that, because of these properties, shared control had also been called *haptic guidance* or *haptically active controls*.

We consider shared control as a mode of human-machine cooperation (Hoc, Young & Blosseville, 2009). More specifically, we consider human and automaton as two autonomous agents. Thus, whilst we agree with the properties defined by de Winter and Dodou, we also summarize shared control mode in terms of two properties. First, the automaton directly acts on the trajectory, but is limited in its action (by the designer). Second, the same interface is simultaneously used by human and machine in order to act on the trajectory. Thus, the haptic guidance is a result of these two properties, because the device acts continuously on the steering wheel in order to act on the trajectory. In other words, the driver feels the continuous action of the device through haptic modality.

7.2.2 What degree of shared control?

In the present paper we consider sharing control between an anticipatory control law (Saleh, Chevrel & Lafay, 2010) and the driver. This control law is based on an H2 optimization algorithm, which includes multiple criteria, such as quality of lane keeping (lateral deviation), lane tracking (heading angle), and assistance effort (control torque). The degree of shared control is determined by applying part ($\alpha\%$) of the calculated torque. See Figure 1 for a more detailed view of the process in action.

The automaton delivers $\alpha\%$ of the optimal torque and the driver has, ideally, to complete this action. However, the driver can deliver a greater or a smaller torque than the theoretical $100-\alpha\%$ torque. The observed allocation of control will be the function of the driver's intervention and $\alpha\%$ choice. Moreover, the maximum torque applied by the machine is also limited to 5 N/m; hence, shared control can be classified as *soft automation* (Young, Stanton & Harris, 2007). In other words, the driver has the final word.

This conception leads to many choices of $\alpha\%$. Taking an empirical approach, it is possible to obtain a shared control in which control is shared almost equally between human and machine. However other degrees of shared control can be obtained with smaller or higher $\alpha\%$. Abbink, Mulder and Boer (2011) specified that the correct level for the torque delivered by such a device is by far the most important question for designers. They discussed levels of haptic authority (LoHA) and the way that LoHA relates to Sheridan's level of automation in the context of shared control when driving.

Indeed, in terms of levels of automation, shared control leads to the identification of the degree of control that the machine will have on the level of action implementation (Parasuraman, Sheridan & Wickens, 2000). The ratio between the automaton's torque and the

real driver's torque depends on the situation. Thus, the simultaneous and complementary actions of these two autonomous agents can be described as cooperation at the action level (Hoc, Young & Blosseville, 2009). In order to get a better understanding of the device's actions, we decompose its interventions into four categories, depending on an analysis of the situation.

Table 8 shows that the device's actions can be decomposed between two extremes. At one extreme, we can observe a total agreement between driver and automaton; there is no action of the device and logically the driver feels no sensation. At the other extreme, where there is total disagreement, the torque of the device can theoretically become higher than the driver's torque, but within the limits of the device. Thus, the driver can always deliver a stronger torque and maintain control of the trajectory.

Table 8 - Interventions of shared control depending on situation analysis by the automaton.

Analysis of the situation by the automaton	Action	Driver's sensation
Total agreement with the driver	No action	No assistance
Partial agreement with the driver	Complementary torque	Lighter steering wheel
Partial disagreement with the driver	Opposite torque lower than driver's torque	More rigid steering wheel
Total disagreement with the driver (within device limitations)	Opposite torque higher than driver's torque	Steering wheel rotates in the opposite direction of the driver's direction

This study first seeks to clarify how different degrees of shared control are integrated in sensorimotor loops. Indeed, very light shared control will probably not help in the implementation of the correct action (not enough haptic guidance). In contrast, strongest levels of shared control can disrupt the implementation of the action (too much direct action on the trajectory). Moreover, negative interference can be hypothesized with stronger degrees of shared control.

7.2.3 Trajectory anticipation

Another key point is the fact that the optimal allocation of shared control may depend on the drivers' ability to correctly anticipate the trajectory. Indeed, Donges (1978) divided steering behaviour into two parallel levels of visual information acquisition. First, the guidance level needs a forward view of the road to anticipate adequate steering control. Donges spoke in terms of the open-loop control mode. Second, the stabilization level compensated for any deviations that occur with the closed-loop control mode.

Identifying an optimal degree of shared control does not mean that this degree is optimal in all situations. Indeed, within some situations, the open-loop control mode can be disrupted because of a decrease in visibility (e.g. at night, or in fog). Indeed, the capacity to anticipate is logically tied to the distance of visibility. For example, a decrease in visibility leads drivers to adopt a more reactive driving strategy in order to be able to quickly react to a critical event (Van der Hulst, Rothengatter & Meijman, 1998). More precisely, this study stated that when there are fewer possibilities for anticipation, drivers compensate by reducing speed and increasing time headway; they are then able to react to potential threats. However, the authors specified that when this compensatory strategy is impossible or undesirable, drivers have to maintain a high state of alertness in order to react accurately to unpredictable hazardous

events. In terms of cognitive control, drivers adopt a compromise in order to become more reactive (Hoc & Amalberti, 2007).

In the event that shared control sensors are not affected by this degradation, it could be argued that a stronger degree of shared control would have a greater effect on the trajectory. Conversely, one could argue that the driver, who is placed in a more stressful context because of the need to drive more reactively in shared control, could be hampered by an action that is too strong. Therefore, it is important to study the effect of decreased anticipation in terms of different degrees of shared control. It is also particularly important to consider how the allocation of control is impacted by a reduction in the driver's capacity to fully anticipate the trajectory.

7.2.4 Visual demand

Finally, it is necessary to study the impact of different degrees of shared control on visual demand. Indeed, helping drivers to follow a particular trajectory leads to a reduction in the demand for visual cues. The visual demand of driving is often determined using visual occlusion (Senders et al., 1967; Tsimhoni & Green, 2001). With this method, drivers press a switch to get a second glimpse of the road; otherwise, the road is occluded. Griffith and Gillespie (2005) have already shown a decrease in visual demand of approximately 29% using their setting of shared control, which compares with and without assistance conditions. This result does not imply that the rate would be constant whatever the degree of shared control. Indeed, it could be supposed that there is a higher reduction of shared control with a higher intervention of the device. For example, Young and Stanton (2002) showed a decrease in mental workload when the level of driving automation increased. In contrast, it could be argued that the necessity for the driver to maintain a minimum degree of steering control produces the same rate in visual demand, whatever degree of shared control is implemented.

7.2.5 Aims of the present study

The main aim of this study is to analyze human-machine cooperation in different situations of shared control. More precisely, we will investigate how different degrees of shared control are integrated in sensorimotor loops.

First, we will manipulate the degree of intervention of the device and, by cross-checking various indicators of lateral control, we will determine the best allocation of control. The assumption is that shared control will increase human-machine performance in lane keeping and will reduce the cost for the driver. However, intervention that is too strong could produce negative interference between the driver and automaton. Slightly more control for the driver would produce the best and most acceptable compromise between human-machine system performance and cost for the driver.

Second, we will study the effect of the driver's capacity to anticipate on the allocation of control. Within situations that produce a reduction in the capacity to anticipate, we hypothesized greater intervention by the automaton would yield approximately the same human-machine performance on lane keeping.

Our third aim is to evaluate the effect of different degrees of shared control on visual demand. We hypothesized that the more control that is given to the automaton, the smaller the visual demand will be for the driver.

Finally, some subjective assessments are put forward that allow the drivers' point of view to be integrated into the analysis.

Figure 27 provides an illustration of the human-machine system in order to gain a better view of the process in action. This figure also represents the factors of trajectory anticipation being studied and α % degree in the human-machine system.

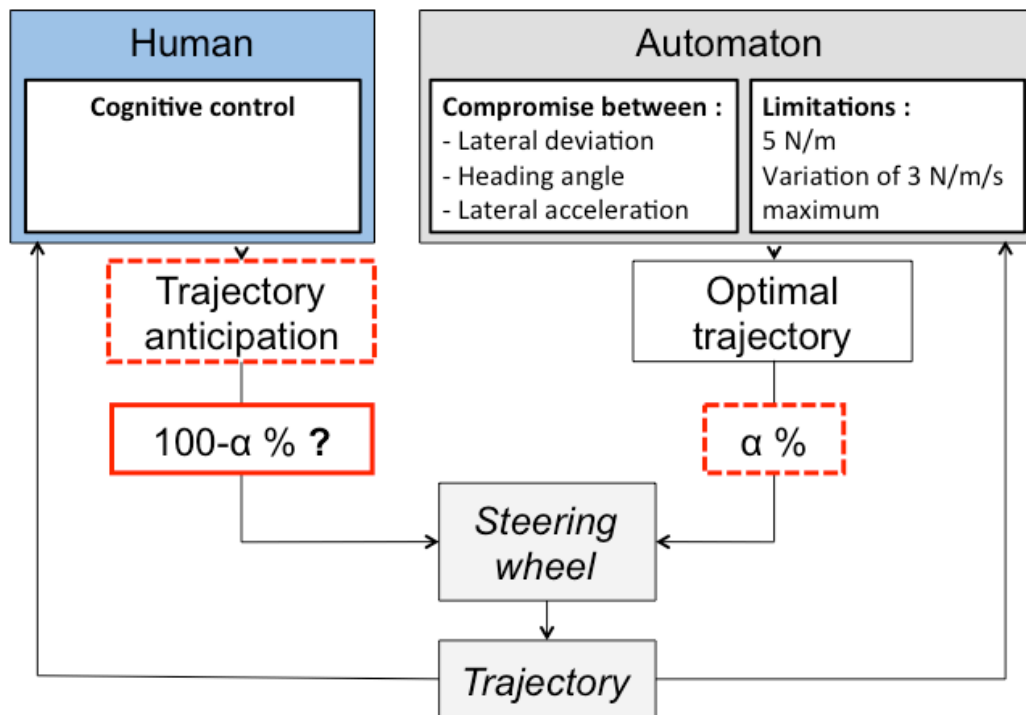


Figure. 27. Illustration of the human-machine system during shared control. The automaton give α % of the optimal torque and the driver delivers additional torque; ideally, this should be $100-\alpha$, but it can correspond to a greater, or smaller, value. Dotted lines identify the factors studied (driver's anticipation and α % of the optimal torque).

7.3 Method

7.3.1 Participants

Twenty-one drivers (15 males, 6 females, 32 years of age on average) participated in the study. They had all held a driving licence for at least 2 years (mean = 11.6 years). Self-reported annual mileage for the past year ranged from 500 to 20 000 Km (mean = 8 690 Km). None of them was familiar with lane keeping assistance systems. The participants reported no motion sickness.

7.3.2 Simulator

The study took place in a fixed-base driving simulator, consisting of a single-seat cockpit with full instrumentation. It was equipped with an active steering system for realistic "scale one" force-feedback. The SCANNeRII⁴ software package was used with the CALLAS[®] dynamic vehicle model (Lechner et al. 1997). The visual environment was displayed on three 32-inch LCD monitors, one in front of the driver and two laterals turned at 45° from the front one, viewed from a distance of about 1 metre and covering 115° of visual angle in width and 25° in height. The graphic database reproduced a country environment.

⁴ <http://www.scanersimulation.com/>

7.3.3 Design

7.3.3.1 Varying the degree of shared control

The main factor considered in this study is the effect on the trajectory of the distribution of the shared control between human and machine. Six driving modalities are studied in this paper. First, a control condition (without assistance), and then, five distinct levels of shared control. The distributions of torque for the assistance device are as follows (see Table 9). A driving modality with another assistance device called motor priming (a sort of haptic warning assistance device, see Deroo, Hoc & Mars (2012), for more details), was also studied. Results for motor priming device are not presented in this paper in order avoid blurring the topic. The presence of this device had a methodological effect on the number of group constituted to counterbalance assistance order effects. However, it is expected that its presence will have no effect on the results.

Table 9 - Modalities of assistance factor.

Assistance factor	Action of the assistance
1. Without assistance	0 %
2. Motor priming	Not studied in this paper
3. Very light shared control	1 %
4. Light shared control	11 %
5. Medium shared control	21 %
6. Strong shared control	31 %
7. Very strong shared control	100 %

Some explanation should be added to precisely differentiate the different degrees of shared control. For convenience, the abbreviation “SCX” will be employed to speak about “shared control of X%”. However, the chosen values of the shared control are very specific to our control law (Saleh, Chevrel & Lafay, 2010), and cannot be easily generalized to other implementations of shared control. Qualitative discrimination is certainly more appropriate for generalizing to other implementations of shared control. SC11, SC21 and SC31 clearly represent the three moderate settings of shared control between human and machine.

Indeed, with an empirical approach, SC21 shared control between human and machine that was approximately equal. Shared control was smoother with SC11 and stronger with SC31. Indeed, Abbink, Mulder and Boer (2011) regretted that previous studies on shared control did not mention the rationale for determining the various degrees. The authors did add, however, that trial-and-error tuning of the degrees of shared control seems to be the most frequently used approach.

Further explanation should be given about SC01 and SC100. With SC01, no sensation of action was felt and, in contrast with SC100, the delegation could almost be complete. However, the same explanation was given for all shared control settings (from SC01 to SC100); that is to say, participants were given an instruction to drive normally with a device that sometimes acts on the steering wheel. SC01 was used to evaluate the lightest haptic guidance available, at the limit of the conscious field. In contrast, SC100 was used to confront drivers with a very “unwieldy” device.

Last but not least, SC100 guided the vehicle to the centre of the lane without a driver (error 4 cm; standard deviation 4 cm). Thus, the stronger the shared control, the nearer to the lane centre the driver will be guided.

7.3.3.2 Varying the visibility

Drivers were confronted with two different driving situations in order to manipulate their capacity to anticipate the trajectory (Figure 28). In the first driving condition, called *good visibility*, drivers were in a normal situation without disturbing visibility.

In the second condition, called *fog*, visibility was reduced to 50 m. Here, drivers were constrained to adopt a more reactive driving. The shared control was not disturbed by the fog and operated normally.

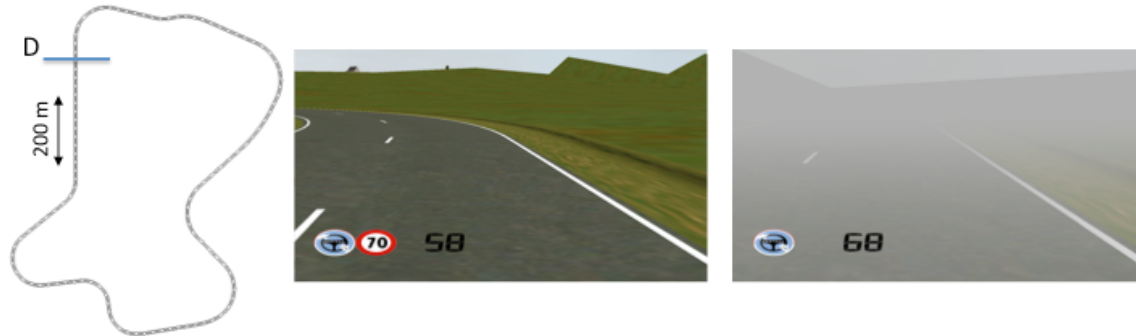


Figure. 28. Test track (on the left) and screenshots showing visibility (good visibility in the middle and fog on the right). The “D” presented on the circuit represents the starting point. In the screenshots, the blue steering wheel icon was an indicator of the activation of shared control. A speedometer (on the middle and right screenshots) and a speed limit sign (on the middle screenshot) were present in order to assist the drivers in their compliance with the speed instruction.

7.3.3.3 Visual demand situation

In order to measure the visual demand of the driving task, drivers were confronted with another specific situation. In this scenario, the effects of shared control were measured with reduced visual feedback. The graphical display was black, except when a visual refresh was requested by the participant. One second of vision was permitted with each press of the wiper controls. The request for visual feedback provided a measure of the participants’ average demand in terms of visual cues.

7.3.4 Procedure and driving task

In order to allow drivers to get used to the driving simulator, they were first asked to complete a familiarization lap. The only instruction was to comply with speed limits (70 Km/h) and drive as they would do in real life. In order to help them comply with this instruction, a digital speedometer was provided on the visual scene. Moreover, a speed limit sign appeared when they were not driving between 65 and 75 Km/h. Finally, when shared control was activated at speeds of 30 Km/h or more, an indicator was displayed to confirm this activation.

All drivers completed the three experimental scenarios (visibility, fog and visual demand) with each modality of the assistance factor. Thus, for all drivers the experiment consisted in performing 21 complete laps of a country road route. Each lap took slightly more than 2 minutes to complete and corresponded to a distance of about 2.5 Km. The road was a single-carriageway highway, made up of a mixture of curved and straight-line sections. The driving lane was 3 m wide and delineated with a broken centreline and an edge line. Other vehicles were simulated occasionally in order to encourage participants to remain in their own lane. Only one intersection was included, some metres beyond the starting point, although no vehicles emerged from it.

After each modality of the assistance factor (every 3 laps), drivers performed an evaluation of each shared control setting by means of a questionnaire. This comprised of questions about comfort, safety, control of the situation and visual demand.

Finally, participants were divided into seven groups, in order to counterbalance the order of assistance settings.

7.3.5 Measures

Four variables for steering behaviour and trajectory were computed for good visibility and fog situations (steering wheel reversals frequency, steering effort, lateral position and variability of the lateral position). Then, one variable (visual demand) was computed for the visual demand scenario. All data were recorded at 20 Hz. In addition, subjective data were computed by questionnaire.

7.3.5.1 Steering wheel reversals (SWR) and steering effort (SE)

In order to measure steering control and the physical cost of steering control, we used the frequency of steering wheel reversals (SWR) and the steering effort (SE). The steering wheel reversals frequency is defined as: $SWR = nb/T$; in which nb = number of changes of direction in steering wheel rotation over one lap and T = duration of the lap.

In order to measure the effort requirement for maintaining the vehicle in the lane over one lap, we used a signal-processing analysis of energy on the steering torque signal (N/m). Thus, the energy SE of this continuous-time signal of steering torque is defined as: $SE = \int_0^T \Gamma_d^2 dt$ with Γ_d = driver's torque expressed in N/m, and SE in N/m^2 . Thus, the steering effort (SE) corresponds to the sum of the square of the steering torque over one lap. It will be used as a reference to evaluate the impact of shared control on steering effort.

7.3.5.2 Lateral position during bends (LP) and variability of lateral position (vLP)

In order to summarise the trajectory produced by the human-machine system we looked at the mean lateral position during bends and the variability of the lateral position over the lap.

The lateral position during bends is computed by the distance between the centre of the lane and the centre of the vehicle. Data for right bends and left bends were standardized in order to obtain an indicator of the tendency to straighten up in the bends. Thus, inversed data for right bends were then regrouped with the data for left bends.

The variability of the lateral position corresponds to the variability of the vehicle around the mean lateral position, that is to say the standard deviation of the lateral position. Both of these indicators were used to evaluate the modification of the trajectory by shared control.

7.3.5.3 Visual demand (VisD)

We also examined visual demand. A measure of average visual demand was computed using: $VisD = nb/T$; in which nb = number of key presses over one lap and T = duration of the lap (Tsimhoni & Green, 2001; Griffith & Gillespie, 2005).

7.3.5.4 Questionnaire

Drivers had to evaluate the effect of shared control on comfort, safety, control of the situation and visual demand in comparison with driving without assistance. The questions were based on the following format: “*Is driving with shared control comfortable?*”

They then had to position themselves on a 10-cm analogical scale from “full disagreement” to “full agreement”.

7.3.6 Data Analysis

The significance of the effects of all independent variables was assessed for LP, vLP, SWR, SE, VisD and the questionnaire by repeated measures ANOVAs with an embedded factor for counterbalancing. For analyses with more than two degrees of freedom, the quadratic means (\bar{b}) was taken. In addition, the population effects sizes were evaluated on the basis of fiducial inference. Fiducial inference (Rouanet and Lecoutre 1983, Rouanet 1996, Lecoutre and Poitevineau 2005) is a variant of Bayesian statistical inference, aimed at concluding on the population effect size (δ) on the basis of the observed effect (d), the sample size, and the variability. It goes beyond the test of significance, which only concludes in terms of the existence of a non-null effect. In this paper, we will give conclusions on effect sizes with a guarantee of .90. For example “ $\delta > 20$ ” will mean “the probability for δ being greater than 20 is .90”.

For data analysis, the following statistical design was used. First, for good visibility and fog: $S3 <G7> * A6 * C2$, then for visual demand: $S3 <G7> * A6$; with S: subject (imbedded in groups: 3 per group), G: group for counterbalancing; A: assistance, C: condition (good visibility, fog).

7.4 Results

The results are represented graphically (Figure 29, Figure 30 and Figure 31). The chosen representation is a continuous scale between different degrees of shared control. In order to represent the break in continuity between first SC00 and SC01 and then SC31 and SC100, double lines are presented using an ordinate scale.

First, we analysed steering control (steering wheel reversals and steering effort). We then looked at the trajectory produced by the human-machine system (lateral deviation during bends and variability of the lateral position over the lap).

7.4.1 Frequency of Steering Wheel reversals and Steering Effort

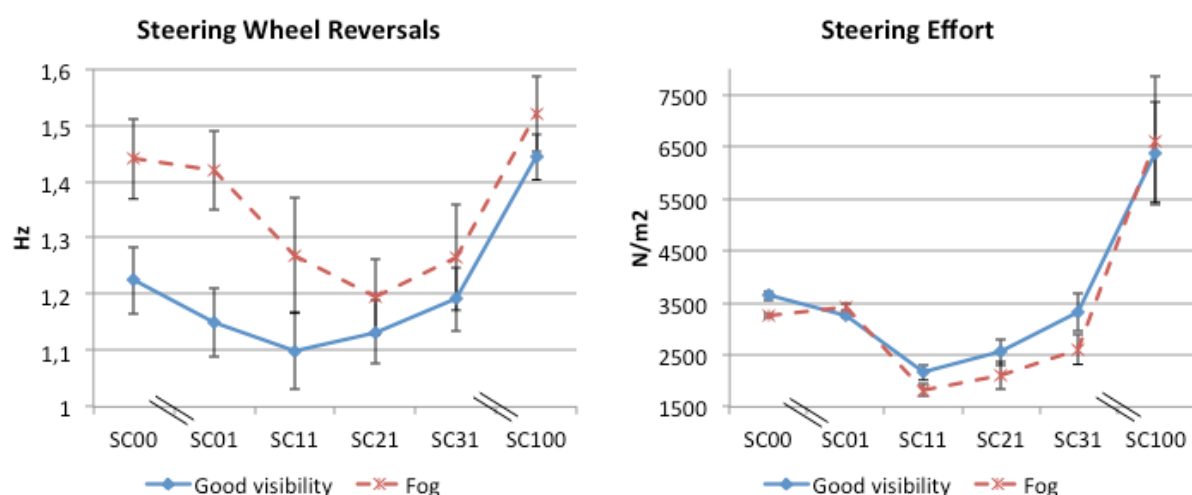


Figure. 29. Steering wheel reversals and steering effort as a function of the degree of shared control. Error bars represent standard errors of the means.

Tableau 10 - Analyses performed on the Steering wheel reversals and Steering effort.

Variable	Comparison	l or d	Bayesian conclusion	Test	LoS
Steering wheel reversals (Hz)	A.V	l =0.12		F(5,70)=5.38	p=0.0003*
	SC00 vs. SC01	d=0.05	no gen.	t(14)=1.62	p=0.1270
	SC00 vs. SC11-SC31	d=0.14	$\delta > 0.10$	t(14)=4.28	p=0.0008*
	SC00 vs. SC100	d=0.15	$\delta > 0.08$	t(14)=3.09	p=0.0080*
	V / SC00-SC11	d=0.22	$\delta > 0.15$	t(14)=4.55	p=0.0005*
	V / SC21-SC100	d=0.07	$ \delta < 0.11$	t(14)=2.25	p=0.0411*
Steering effort (N/m ²)	A.V	l =547		F(5,70)=0.58	p=0.7166
	SC00 vs. SC11-SC31	d=1162	$\delta > 869$	t(14)=5.33	p=0.0001*
	SC11 vs. SC21-SC31	d=659	$\delta > 357$	t((14))=-2.94	p=0.0108*
	SC00 vs. SC100	d=2916	$\delta > 1497$	t(14)=-2.76	p=0.0152*
	V / SC11-SC31	d=503	$\delta > 332$	t(14)=3.96	p=0.0014*

Note: A: assistance (SC00=without assistance, SCxx=SCxx%); V: visibility. Formalism used for comparisons: “vs.” means “versus”; “-” means “to” (SC11-SC31 means SC11, SC21 and SC31 regrouped); “/” means “for”; “no gen.” means no Bayesian generalization.

7.4.1.1 Steering wheel reversals

The steering wheel reversals without shared control were, on average, 1.22 Hz. The shared control (A) and the visibility (V) had a significant interaction (Table 10 and Figure 29). Some points of interest relating to this variable were observed.

First, the decrease in steering wheel reversals with SC01 is not significant. Of particular interest is the fact that the frequency of steering wheel reversals notably decreases ($\delta > 0.10$ Hz) with moderate degrees of shared control (SC11, SC21 and SC31). Finally, by way of contrast, SC100 notably increases steering wheel reversals ($\delta > 0.08$ Hz). In conclusion, a reduction of the frequency of steering wheel reversals, which is one of the aims of shared control, is produced with moderate settings of shared control. However, stronger intervention increases steering wheel reversals.

Second, the higher the degree of shared control, the less that a decrease in visibility has an effect on steering wheel reversals. Without shared control and with light settings of shared control (SC01 and SC11) the effect of visibility is notable ($\delta > 0.15$). However, with higher settings of shared control (SC21, SC31 and SC100), the effect of visibility is significant but smaller than previously ($|\delta| < 0.11$). In other words, with higher settings of shared control the steering control became more homogenous with and without fog.

7.4.1.2 Steering effort

The steering effort without shared control was, on average, 3544 N/m². This value, computed by the sum of the square of the steering torque during the lap without assistance, will be used as a reference to evaluate the impact of shared control on steering effort. No significant interaction between A and V (Table 10 and Figure 29) was observed (p=0.7166).

On closer examination, the data reveals several interesting points. First, the standard errors of means are very small, except with SC100. Thus, with the same driving situation, all drivers delivered approximately the same steering effort over one lap, except when driving with SC100. Shared control moderate settings (SC11, SC21 and SC31) reduce the physical effort required to keep the vehicle in the lane ($\delta > 869$ N/m²). Better results were obtained with SC11. In this study, with SC11, the steering effort was approximately reduced by 39% with

normal visibility and 50% with fog, in comparison with the same driving condition without assistance. SC21 and SC31 increased steering effort in comparison with SC11 ($\delta > 357 \text{ N/m}^2$).

On the contrary, SC100 caused an increase in steering effort ($\delta > 1497 \text{ N/m}^2$). This could certainly be explained by the competition between some drivers and the automated device in terms of the control of the steering wheel. The increase in steering wheel reversals seems to confirm that fact.

Finally, visibility decreased the steering effort with SC11, SC21 and SC31 ($\delta > 332 \text{ N/m}^2$). Thus, decreasing the ability to anticipate led to more action being delegated to the device (with moderate settings).

7.4.2 Lateral position during bends and SD of the lateral position

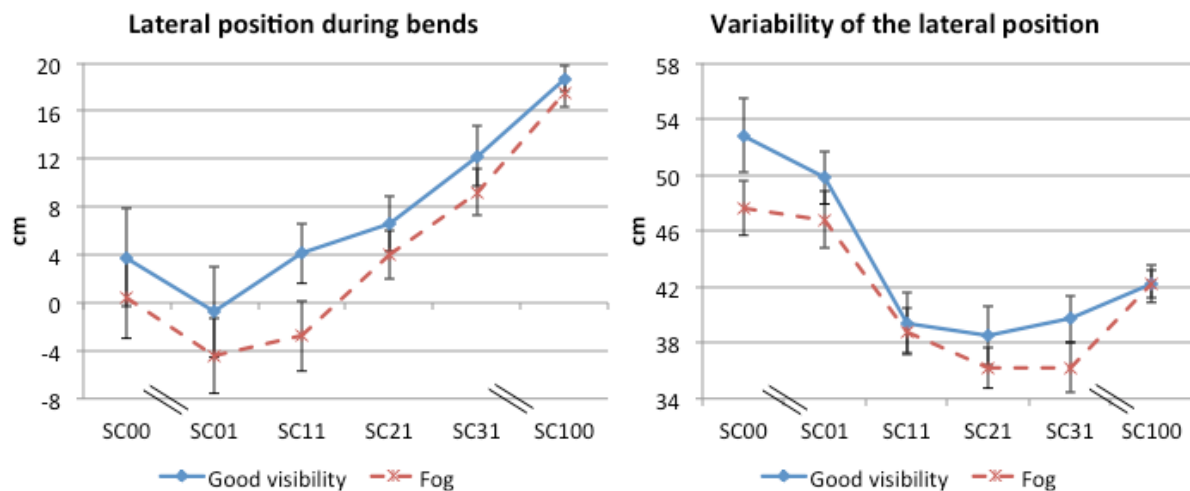


Figure. 30. Lateral position during bends and SD of the lateral position as a function of the degree of shared control. Error bars represent standard errors of the means.

Table 11 - Analyses performed on the Lateral position and the Variability of the lateral position.

Variable	Comparison	l or d	Bayesian conclusion	Test	LoS
Lateral position during bends (cm)	A.V	l = 2.3		F(5,70)=1.33	p=0.2627
	A	l = 9.1		F(5,70)=48.18	p=0.0001*
	V	d = 3.8	$\delta > 2.2$	t(14)=3.20	p=0.0064*
	SC00 vs. SC01	d = 4.5	$\delta > 3.3$	t(14)=5.02	p=0.0002*
	SC00 vs. SC11-SC21	d = 0.8	no gen.	t(14)=0.63	p=0.5371
Variability of the lateral position (cm)	SC00 vs. SC31-SC100	d = 9.5	$\delta > 7.6$	t(14)=6.78	p=0.0001*
	A.V	l = 2.7		F(5,70)=1.86	p=0.1132
	SC00 vs. SC01	d = 1.9	no gen.	t(14)=1.19	p=0.2529
	SC00-SC01 vs. SC11-SC100	d = 11.1	$\delta > 9.47$	t(14)=9.35	p=0.0001*
	V / SC00-SC01	d = 4.1	no gen.	t(14)=3.22	p=0.0061*
	V / SC21-SC31	d = 2.9	no gen.	t(14)=2.46	p=0.0273*
	V / SC11	d = 0.6	$ \delta < 2.75$	t(14)=0.41	p=0.6865
	V / SC100	d = 0.1	$ \delta < 2.02$	t(14)=-0.01	p=0.9896

Note: A: assistance (SC00=without assistance, SCxx=SCxx%); V: visibility. Formalism used for comparisons: “vs.” means “versus”; “-” means “to” (SC11-SC31 means SC11, SC21 and SC31 regrouped); “/” means “for”; “no gen.” means no Bayesian generalization.

7.4.2.1 Lateral position during bends

The lateral position in bends without shared control was, on average, 3.8 cm. This means that the vehicle without assistance straightens up toward the inside of bends for 3.8 cm on average. Shared control (A) and visibility (V) had a significant effect on the lateral position (Table 11 and Figure 30). However, no significant interaction between them was observed ($p=0.2627$).

In a general way, the reduction in visibility produces less straightening. Specifically, the less visibility that drivers have, the closer they stay to the lane centre.

A very light shared control (SC01) significantly alters the average position and produces less straightening than without assistance ($\delta > 3.3$ cm). SC11 and SC21 were not significant when compared to SC00. This means that with light and medium shared controls (SC11 and SC21) the vehicle has a position similar to that spontaneously adopted without assistance. However this result cannot be generalized by Bayesian conclusion.

Finally, it is of particular interest that only the largest settings of shared control (SC31 and SC100) notably alter the average position in the lane ($\delta > 7.6$ cm). With these settings, drivers straightened up more than without assistance. One should bear in mind that without a driver being present, these settings would mean the vehicle would be driven approximately in the lane centre. Thus, it is the interaction between human and machine that produces this greater straightening up toward the inside of bends.

7.4.2.2 Variability of the Lateral Position

The variability of the lateral position without shared control was, on average, 52 cm. Shared control (A) and visibility (V) had no significant interaction (Table 11 and Figure 30). The main result of graphical analysis is that the vehicle's trajectory is smoother with shared control. On more detailed examination, the difference between SC00 and SC01 is not significant ($p=0.2529$). For SC11, SC21, SC31 and SC100, the variability of the lateral position decreased in comparison with SC00 and SC01 ($\delta > 9.47$ cm).

It is of particular interest that visibility significantly reduced the variability of the lateral position both with SC00 and SC01 ($p=0.0061$). It also reduced the variability of the lateral position with SC21 and SC31 ($p=0.0273$). However, these differences cannot be generalized by Bayesian conclusion.

Visibility had no significant effect with SC11 ($p=0.6865$) and SC100 ($p=0.9896$). In conclusion, a reduction in visibility also reduces the variability of the lateral position, except for SC11 and SC100.

7.4.3 Visual demand

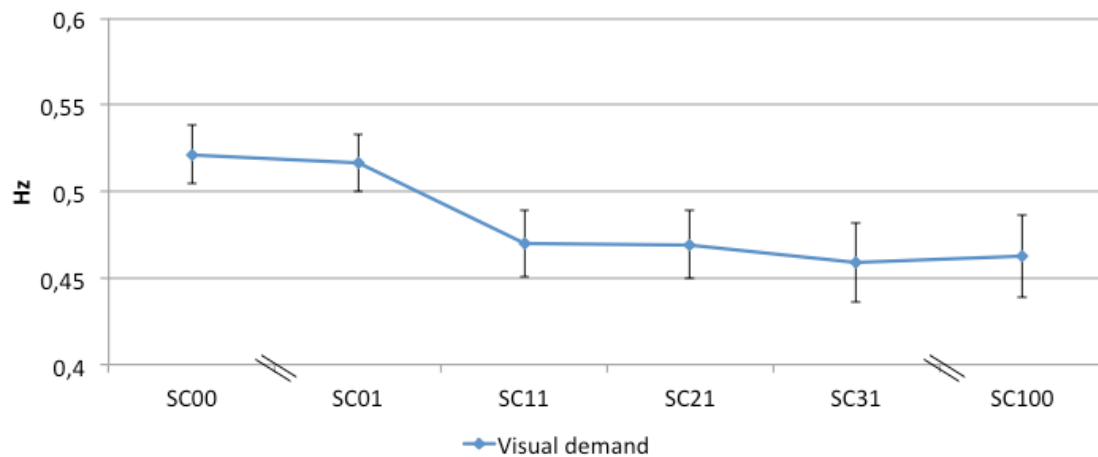


Figure. 31. Visual demand as a function of the degree of shared control. Error bars represent standard errors of means.

Tableau 12 - Analyses performed on Visual Demand.

Variable	Comparison	l or d	Bayesian conclusion	Test	LoS
Visual demand (Hz)	A				
	SC00 vs. SC01	l = 0.04	$ \delta < 0.01$	$F(5,70) = 8.23$	$p = 0.0001^*$
	SC00-SC01 vs. SC11-SC100	d = 0.01	$\delta > 0.04$	$t(14) = 0.76$	$p = 0.4604$
		d = 0.05		$t(14) = 4.61$	$p = 0.0004^*$

Note: A: assistance (SC00=without assistance, SCxx=SCxx%); V: visibility. Formalism used for comparisons: "vs." means "versus"; "-" means "to" (SC11-SC31 means SC11, SC21 and SC31 regrouped).

Visual demand without assistance was, on average, 0.52/s (Table 12 and Figure 31). Shared control (A) had a significant effect on it. Detailed analysis of the data shows no difference between without assistance (SC00) and SC01 ($|\delta| < 0.01/s$). However, the visual demand significantly but slightly decreases with SC11 and higher degree of shared control ($\delta > 0.04$ nb/s). In terms of percentages, SC reduces the visual demand by approximately 7%.

Data analyses revealed no other notable differences. Thus, shared control delivers a gain in visual demand with SC11; however, there is no additional gain with stronger intervention of shared control.

7.4.4 Subjective assessment

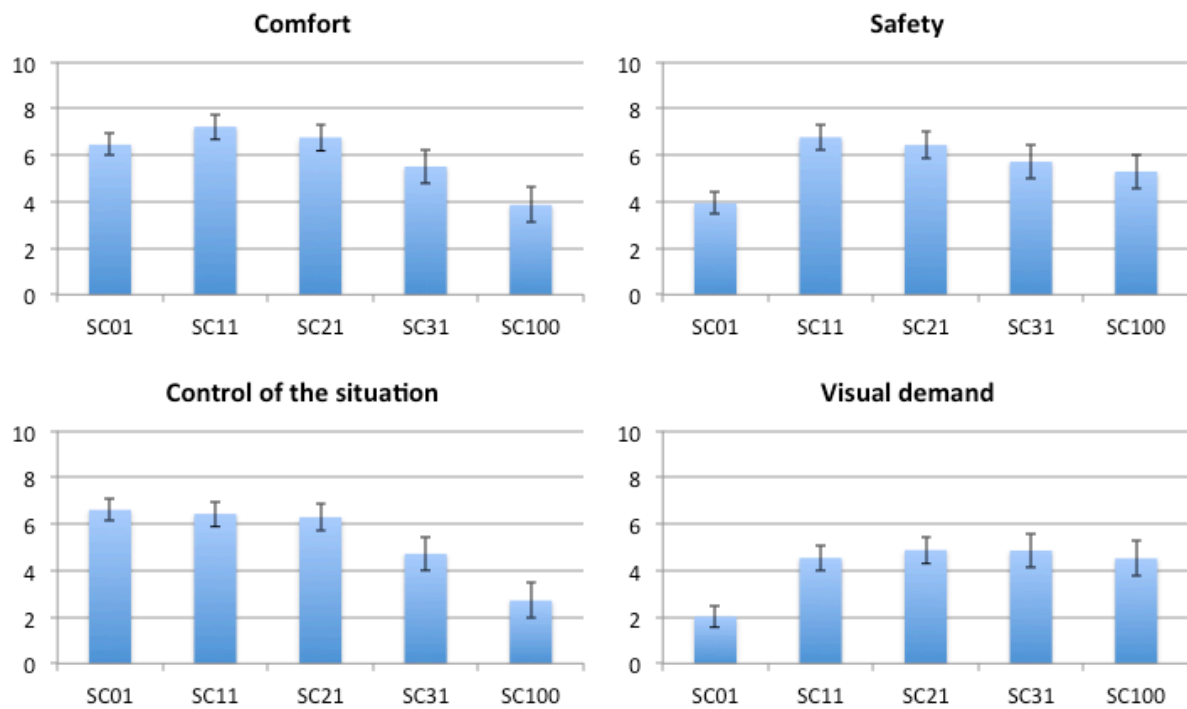


Figure. 32. Subjective comparison between shared control and driving without assistance in terms of comfort, safety, control of the situation and visual demand. Error bars represent standard errors of means.

Tableau 13 - Analyses performed on the questionnaire.

Variable	Comparison	d	Bayesian conclusion	Test	LoS
Comfort	SC01-SC21 vs. SC31-SC100	d=2.1	$\delta > 1.2$	t(14)=2.97	p=0.0102*
Control of the situation	SC01-SC21 vs. SC31-SC100	d=2.7	$\delta > 2.1$	t(14)=5.48	p=0.0001*
Safety	SC01 vs. SC11-SC100	d=2.1	$\delta > 1.2$	t(14)=3.09	p=0.0079*
Visual demand	SC01 vs. SC11-SC100	d=2.7	$\delta > 1.9$	t(14)=4.44	p=0.0006*

Note: A: assistance (SC00=without assistance, SCxx=SCxx%). Formalism used for comparisons: “vs.” means “versus”; “-” means “to” (SC11-SC31 means SC11, SC21 and SC31 regrouped).

From a global viewpoint, these graphs can be grouped by pairs (Table 13, Figure 32). First, items that relate to comfort and control in a situation present similar patterns. Indeed, in relation to these items, SC01, SC11 and SC21 are fairly close. Moreover, SC31 and SC100 have been assessed as less comfortable ($\delta > 1.2$) and more difficult to control ($\delta > 2.1$) in comparison with the previous three settings.

Second, items about safety and visual demand also present similar patterns. Only SC01 presents no advantage in terms of security ($\delta > 1.2$) and no reduction in visual demand ($\delta > 1.9$).

In other words, light and medium settings are evaluated positively on the four dimensions of comfort, control of the situation, safety, and visual demand. When SC is too light (SC01)

there is no gain in safety and visual demand. By contrast, when SC is too strong (SC31 and SC100) it becomes less comfortable and more difficult to control.

7.5 Discussion and conclusions

The aim of the present paper was to investigate how different degrees of shared control are integrated in sensorimotor loops. Another key point is that the optimal allocation of shared control may depend on the ability to fully anticipate the trajectory.

In summary, the effects of shared control depend on the degree of sharing and its ability to anticipate on the driver's behalf. Light and medium settings have the greatest impact on performance improvement. Indeed, better results are obtained with SC11 with good visibility. However, when visibility was reduced, SC21 produced the best results in terms of the frequency of steering wheel reversals as well as the variability of the lateral position.

In order to analyze human-machine cooperation during shared control we will start by discussing the effects observed on steering control and any subsequent modifications to trajectory. We will then discuss visibility effects and visual demand results together. Finally, we will discuss the question of authority within the shared control paradigm.

7.5.1 Sensorimotor control and effects on the trajectory

In terms of trajectory, there was a clear break between SC21 and SC31. To summarize, the light and medium settings were well integrated into the sensorimotor loop and allowed the driver to choose the trajectory, which was quite similar but smoother (reduction in variability of the lateral position) than that chosen without assistance. So, light and medium settings led to an increase in performance and, for the driver, a decrease in the cost of driving with a much greater degree of control.

However, the strongest degrees of shared control interfered negatively for the drivers by changing the vehicle's position in the lane. In fact, drivers came into conflict with shared control when it was too strong. The fact that drivers tend to straighten the trajectory more with the strongest degree of shared control is contrary to our expectations. Instead of delegating, and adapting their control to the degree of sharing, drivers chose to fight against the loss of control. One hypothesis is that, by straightening up more, drivers have deliberately chosen to interfere with the machine, rather than "put up with" the trajectory it has chosen. The irony is that, instead of producing an intermediary trajectory between human and machine, this situation produced a trajectory that was even more dependent on the machine's point of view.

The results of the subjective assessment of shared control can contribute to this discussion. Drivers preferred light and medium levels of shared control (SC11 and SC21). Furthermore, drivers confirmed a feeling of loss of control with the strongest shared control. In other words, although drivers produced a very different trajectory from the one wanted by the machine, this did not happen easily and left the impression of not having the situation under control.

7.5.2 Visual information with shared control

In this discussion, we first revisit our results on visual demand and a decrease in the capacity to anticipate. Indeed, these analyses are complementary. We will then discuss the need for visual information during shared control. For example, results obtained for visual demand could explain results obtained for a decrease in capacity to anticipate.

Visual demand decreased only slightly (10%) compared with the 29% of decrease previously

observed by Griffiths and Gillespie (2005). The degree of difficulty of the test track used may explain this difference. However the most interesting result is that the visual demand remained constant between the different degrees of shared control. Even with the highest degrees of shared control, the drivers seemed to need the same level of visual demand. Thus, it is not possible to distinguish between the degrees of shared control intervention based only on visual demand. In contrast, other variables, such as the effects of sensorimotor control on the trajectory, may seem preferable when determining degrees of shared control.

Since visual demand decreased with shared control, it is logical that the effect of visibility reduced with shared control. However, differences between different degrees of shared control are observed with visibility modifications but not with visual demand scenarios. When the capacity to anticipate decreased, drivers were able to delegate more with SC21 and SC31 but not with SC11 and SC100. Two different explanations can be put forward. With SC11, drivers provided approximately the same effort both with and without fog. One hypothesis is that light intervention produced a small haptic guidance, so, drivers did not delegate more when the capacity for anticipation deteriorated. On the contrary, the extreme conditions of SC100 were unique. The drivers' struggle with the device did not allow them to delegate more when it was needed. Thus, when the reduction on visual demand was equivalent, differences in steering control and, therefore, differences in lane keeping performance were produced. In other words, the same decrease in visual demand does not mean that it will have the same effect on steering control for each degree of shared control.

These results lead to the question of authority allocation. Indeed, with SC11, if drivers were aware of their full authority, an increase in the degree of shared control could have produced some confusion in terms of the sharing out of authority.

7.5.3 Authority confusion?

The aim of shared control is continuous variation of the level of intervention. This is both its main advantage and its main disadvantage. De Winter and Dodou (2011) underlined the crucial point of authority problems. With shared control, authority uncertainty can be summarized by three questions: Who controls? Who operates? To what extent? Indeed, in this present study, such uncertainty did lead to some confusion and/or conflict on who was in charge of the driving task and what the driver had to do: in other words, either “obey” the machine, or counteract the torque. With the highest degrees of shared control, drivers changed their trajectories in order to counteract high levels of machine intervention. Drivers did not delegate, nor did they cooperate; rather, they fought for control. A crucial point, then, is the relationship between control and authority.

The concept of authority is used in different contexts with different meanings. For example, the distinction between soft and hard automation is based on the idea that the authority is the attribute of only one agent (driver or automaton). Within the shared control paradigm, the question could be that of the relationship between sharing the control and sharing the authority. In other words, is authority also shared when control is shared?

Inagaki (2003) suggested that authority was one of the most crucial issues in adaptive automation. Adaptive automation refers to the dynamic allocation of function (Endsley & Kaber, 1999). Shared control is not properly speaking an adaptive automated device; however, this question must be raised because of the continuous variation of intervention of the automaton on the control of the trajectory. So, further research should study the relationship between control and authority in human-machine systems, particularly in terms of the paradigm of shared control.

Our results suggest that drivers clearly wished to maintain authority. Even with the strongest

degree of shared control, drivers tried to impose their trajectory on the machine, coming into conflict with it. We consider that interesting results could be obtained by carrying out the same experiment, but varying the instructions given to the drivers. An instruction of authority given to the machine should certainly mean that more delegation is observed, with less conflict and better performance.

7.6 Conclusions

When studying shared control, it is difficult to generalize the results. We found that according to the degree of shared control, different effects on human-machine system performance and the cost to the driver are observed. However, in the literature, the authors do not usually describe what level of sharing is studied. Thus, it is important to accurately describe the effects of the device on the driver, such as haptic guidance, and the direct effects that the device has on the trajectory. Moreover, the reference used by the shared control must be specified. In this study the most powerful setting tended to lead the vehicle into the centre of the lane, but other references can be selected. For example, a driver model integrated in control law (Mars et al. 2011), would generate more "realistic" trajectories; these may be less annoying for the driver, even if they have a very strong degree of shared control.

It also seems preferable to adjust the degree of sharing to match the situation. Stronger shared control may be necessary in situations when the ability to anticipate decreases. However, drivers already have difficulties in clearly identifying what the machine does; they may be even more confused if the degree of shared control changes with the context. This could greatly complicate the development of a clear representation in terms of the role played by each agent. In conclusion, further study should be carried out on the communication between humans and automation; for example, using head-up-displays.

The notion of authority could be an interesting way to further explore within the shared control paradigm. However, it does give rise to a number of questions. What about the relationship between authority and responsibility? What about the relationship between control, authority and responsibility in other contexts of human-machine cooperation? Indeed, if authority is delegated, but responsibility is not, then the activity of supervision will be improved in the task.

Finally, direct intervention on steering control requires the study of longitudinal effect. A particular degree of shared control could produce different results between a first trial and more experienced use of a device. Moreover, drivers' reactions during critical events could be highly affected by a high degree of integration of the device intervention in their sensorimotor loops.

Acknowledgement

This research was supported by the ANR-VTT: PARTAGE project 0866C0222.

7.7 References

- Abbink, D., A., & Mulder, M. (2010). Neuromuscular analysis as a guideline in designing shared control. *Advances in Haptics*, 109, 499–516.
- Abbink, D., A., Mulder, M., & Boer, E., R. (2011). Haptic shared control: smoothly shifting control authority. *Cognition, Technology & Work*, 14, 19-28.
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19, 775–779.

- de Winter, J.C.F., & Dodou, D. (2011). Preparing drivers for dangerous situations: A critical reflection on continuous shared control. In: *IEEE proceedings of the IEEE SMC conference*, Anchorage, Alaska, USA.
- Deroo, M., Hoc, J.M. & Mars, F. (2012). Influence of risk expectation on haptically cued corrective manoeuvres during lane departure. *Ergonomics*, 55, 465-475.
- Donges, E. (1978). A two-level model of driver steering behaviour. *Human Factors*, 20, 691-707.
- Griffiths, P.G., & Gillespie, R.B. (2005) Sharing control between humans and automation using haptic interface: primary and secondary task performance benefits. *Human Factors* 47, 574–590.
- Endsley, M., & Kaber, D.B. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, 42, 462-492.
- Harris, D., & Harris, F.J. (2004). Evaluating transfer of technology between application areas; a critical evaluation of the human component in the system, *Technology in Society*, 26, 551–565.
- Hoc, J.M., Mars, F., Milleville-pennel, I., Jolly, E., Netto, M., & Blosseville, J.M. (2006). Evaluation of human-machine cooperation modes in car driving for safe lateral control in curves: delegation and mutual control modes. *Le Travail Humain*, 69, 155–185.
- Hoc, J.M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive Control Dynamics for Reaching a Satisficing Performance in Complex Dynamic Situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1, 22-55.
- Hoc, J.M., Young, M.S., & Blosseville, J.M. (2009). Cooperation between drivers and automation : implications for safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10, 135-160.
- Lechner D., Delanne Y., Schaefer G., & Schmitt V. (1997). *Méthodologie de validation du logiciel de dynamique automobile CALLAS*. SIA 970202. Congrès SIA Lyon, Avril 1997. Reprinted in *Ingénieurs de l'automobile* N°713, May 1997.
- Mars F., Saleh L., Chevrel P., Claveau F. & Lafay J.F. (2011). Modelling the visual and motor control of steering with an eye to shared-control automation. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 55th Annual Meeting – 2011* (pp. 1422-1426). ISBN: 978-0-945289-39-5
- OCDE (1990). *Adaptations du comportement aux changements dans le système de transports routiers*. Paris: Organisation de coopération et de développement économiques.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 30, 286-297.
- Saleh, L., Chevrel, P., & Lafay, J.F. (2010). Generalized H2-preview control and its application to car lateral steering. In *Proceedings IFAC Time Delay Systems 2010* (pp. LS 796), Praha, Czech Republic, (2010-06-07).
- Senders, J., Kirstofferson, A., Levison, W., Dietrich, C., & Ward, J. (1967). The attentional demand of automobile driving. *Highway Research Record*, 195, 15-33.
- Sheridan, T. B. (1992). *Telerobotics, automation, and human supervisory control*. Cambridge, MA: MIT Press.

- Tsimhoni, O., & Green, P.A. (2001). Visual demand of driving and the execution of display-intensive in-vehicle tasks. In *proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 45th Annual Meeting* (pp. 1586-1590). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics society.
- Van der Hulst, M., Rothengatter, T., & Meijman, T. (1998). Strategic adaptations to lack of preview in driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 1, 59-75.
- Young, M.S., & Stanton, N.A. (2002). Malleable attentional resources theory: a new explanation for the effects of mental underload on performance. *Human Factors*, 44, 365-375.
- Young, M.S., Stanton, N.A. & Harris, D. (2007). Driving automation: learning from aviation about design philosophies, *International Journal of Vehicle Design*, 45, 323–338.

Chapitre 8 - Contrôle partagé du volant et conséquences sur les mécanismes adaptatifs

« L'esprit humain s'habitue très vite à l'étrangeté si celle-ci ne montre pas de comportement intéressant. »

L'éveil d'Endymion, 1998, **Dan Simmons**

SOMMAIRE

- 8.1 Objectif de l'étude
 - 8.2 Introduction
 - 8.3 Méthode
 - 8.4 Résultats
 - 8.5 Discussion
 - 8.6 Conclusion
 - 8.7 Références
-

RESUME

Objectifs. Cette étude explore les conséquences d'une conduite prolongée avec une assistance à la conduite. Cette assistance consiste à partager, en continu, le contrôle du volant pour contrôler la trajectoire. **Background.** Partager le contrôle du volant entre conducteur et automate permet de faciliter le maintien dans la voie tout en augmentant le confort de conduite. En se basant sur l'anticipation d'une trajectoire optimale, le dispositif applique une partie de la réponse motrice, corrigeant ainsi partiellement la trajectoire tout en fournissant un guidage haptique au conducteur. Le dispositif intervenant directement dans les boucles sensori-motrices, il devient très important de s'intéresser aux mécanismes adaptatifs mis en jeu, qu'ils aient des effets positifs ou négatifs en termes de performance, du fait de la modification de l'activité de guidage de la trajectoire. **Méthode.** Afin de quantifier les

adaptations nous avons étudié l'évolution des trajectoires au cours de 13 tours de circuits (4,4 Km par tour) en divisant 24 conducteurs en deux groupes de sujets (conduite avec ou sans contrôle partagé). Nous avons également étudié les effets de la pratique sur des situations critiques de contournement d'obstacle et de défaillance du dispositif. **Résultats.** Les résultats montrent des effets additifs entre pratique et présence de l'assistance, ce qui signifie que les conducteurs continuent à améliorer leur trajectoire malgré les gains immédiats délivrés par l'assistance. De plus, contrairement aux théories sur l'homéostasie du risque, les conducteurs ne semblent pas prendre davantage de risque sur la vitesse, qui constitue la seconde variable constituant les trajectoires. Enfin, durant les situations critiques, seuls les conducteurs ayant pratiqué sans assistance ont appris à régler finement leurs trajectoires, lors de contournements. De la même façon, ces conducteurs n'ayant pas intégré complètement l'action du dispositif dans leurs routines de contrôle de la trajectoire, ne sont pas gênés lors de la défaillance, à l'inverse des conducteurs ayant conduit longtemps avec le contrôle partagé. **Conclusions.** Ces résultats nous permettent de conclure à un processus identique de routinisation de l'activité de guidage avec ou sans contrôle partagé ainsi qu'à l'élaboration d'un modèle interne intégrant l'intervention du dispositif pour les conducteurs ayant pratiqué avec contrôle partagé. **Applications.** Ces conclusions peuvent intéresser les chercheurs en coopération homme-machine et les concepteurs d'assistances au contrôle de la trajectoire.

Mots clés: Contrôle partagé, contrôle cognitif, guidage haptique, coopération homme-machine, mécanismes adaptatifs.

8.1 Objectif de l'étude

Ce chapitre correspond à un manuscrit d'article en préparation. La version qui est intégrée dans cette thèse est proposée en français et ne comportera donc pas de résumé étendu, à la différence des trois précédents chapitres expérimentaux.

La présente recherche suit directement les travaux du chapitre précédent et consiste à étudier les conséquences en termes de mécanismes adaptatifs d'une conduite prolongée en situation de contrôle partagé. Nous avons choisi d'étudier le degré de contrôle partagé qui nous a semblé le mieux intégré dans les boucles de contrôle sensori-moteur. Dans la terminologie du chapitre précédent, nous allons utiliser un réglage de SC11 (11% du couplé que l'automate calcul comme étant nécessaire est appliqué par le dispositif).

Ce chapitre expérimental a été réalisé en collaboration avec C. Charron. Nous tenons donc à le remercier chaleureusement pour les échanges que nous avons eus avec lui durant la conception, l'expérimentation, l'analyse et la discussion des résultats.

8.2 Introduction

Les effets à long terme de l'utilisation des assistances à la conduite sont l'un des aspects les moins étudiés, tout du moins avant leur commercialisation. Par effets à long terme nous entendons les effets qu'une pratique prolongée d'une assistance va avoir sur l'activité du conducteur et donc sur sa performance de conduite (Saad, 2006). Cette question devient pourtant tout à fait primordiale, dès lors que l'on s'intéresse à une assistance agissant sur la génération des trajectoires, du fait des enjeux très importants en termes de sécurité.

Afin de présenter cette problématique, nous débiterons par introduire la notion d'adaptation nécessaire pour décrire les modifications de l'activité introduites par l'utilisation des assistances. Ensuite, nous détaillerons le dispositif étudié, appelé contrôle partagé, qui produit à la fois une action légère et continue sur la trajectoire tout en fournissant un guidage haptique

au conducteur. Enfin, nous discuterons des effets attendus, en situation nominale ou lors d'événements critiques, d'une conduite prolongée avec ce dispositif de contrôle partagé.

8.2.1 L'adaptation à un nouvel outil

Tout nouvel outil nécessite une période d'adaptation. Piaget (1974) définit l'adaptation comme l'équilibration de deux mécanismes complémentaires : l'assimilation de la situation actuelle à une situation déjà connue et maîtrisée et l'accommodation d'une situation maîtrisée à la nouvelle situation. En adoptant une approche développementale s'inspirant des travaux de Piaget, Rabardel et Béguin (2005) ont décrit le développement de schèmes d'utilisation par des individus confrontés à un nouvel outil. Un schème est défini comme une organisation invariante de l'activité pour une classe de situation (Vergnaud, 1990). Rabardel et Béguin (2005) distinguent alors les schèmes d'usage, de gestion des interactions avec le nouvel outil (assimilation), des schèmes d'actions instrumentées, de modification de l'activité afin d'intégrer l'outil dans la réalisation de la tâche (accommodation). Les auteurs définissent le processus d'instrumentalisation comme un processus d'accommodation des schèmes existants au nouvel outil. Cette distinction relève le fait que le dispositif doit être pris en main, pour être utilisé, mais que de ce fait, ce dispositif va également modifier l'activité du sujet. Cette modification de l'activité va avoir lieu dès la découverte de l'outil et peut éventuellement se traduire, une fois l'instrumentalisation effectuée, par une réorganisation de l'activité à plus long terme.

Enfin, la réorganisation de l'activité résultant de l'instrumentation du dispositif peut produire des effets qui restent présents, même lorsque le dispositif n'est plus utilisé. Par exemple, Ben-Yaacov, Maltz et Shinar (2002) montrent que 50 minutes d'utilisation d'un système d'aide à l'évaluation des distances de sécurité en conduite automobile produit encore des effets sur le respect de ces distances, même 6 mois après son utilisation.

8.2.1.1 L'adaptation comportementale

Dans le cadre de la conduite automobile, l'expression généralement admise pour parler des adaptations aux aides à la conduite est celle « *d'adaptation comportementale* » (OCDE, 1990), bien que les expressions *compensation* ou *autorégulation* soient également rencontrées. Ces expressions décrivent le fait qu'un système, bien qu'identifié comme étant efficace lors de sa conception, se révèle finalement avoir peu d'effets, voir des effets inverses, du fait de modifications à moyen terme de l'activité qui annulent les bénéfices apportés par le système. La réduction des distances de sécurité lors de l'utilisation de l'ABS est un exemple d'adaptation comportementale : les gains en termes de sécurité sont effacés par la réduction de la distance au véhicule qui précède.

Le vocable d'*adaptation comportementale*, pose problème pour deux raisons. Tout d'abord il met souvent l'accent sur les comportements imprévus d'augmentation des risques et adopte, de ce fait, un point de vue plutôt négatif sur les effets d'une utilisation prolongée des dispositifs. Ensuite, il met l'accent sur le comportement sans envisager de mécanismes adaptatifs en termes de processus cognitifs, qui sont pourtant mis en jeu dans le contrôle de l'activité. Nous préférons donc parler de mécanismes adaptatifs dus à la pratique prolongée pour décrire le processus d'adaptation au sens piagétien d'assimilation / accommodation.

8.2.1.2 Le contrôle cognitif

Le modèle du contrôle cognitif décrit par Hoc et Amalberti (2007) permet de rendre compte des régulations de l'activité au niveau cognitif. Ce modèle met notamment l'accent sur un axe nommé niveau d'abstraction des données utilisées dans le contrôle, allant des données les plus symboliques (concepts et signes à interpréter) aux plus subsymboliques (signaux

déclencheurs d'une réponse routinière). Afin de réguler son activité, en économisant des ressources, l'être humain a tendance, en effet, à automatiser au mieux ses connaissances et ses comportements (Amalberti, 1996). Le modèle de Hoc & Amalberti s'inspire de la célèbre classification SRK (*Skill-Rule-Knowledge*) des niveaux de contrôle de Rasmussen (1976) qui souligne ce passage progressif du contrôle de l'activité basé sur des connaissances et des savoirs à un degré de contrôle prenant appui sur les automatismes.

Dans le cadre de la conduite automobile, la tâche de guidage du véhicule nécessite l'exécution de routines avec un très faible niveau de traitement symbolique afin de dégager des ressources symboliques pour la gestion de la dynamique de l'environnement (gestion du trafic, navigation). La tâche de guidage de la trajectoire se fait donc de façon relativement automatique (subsymbolique), lorsque le conducteur a quelques années d'expérience (Michon, 1985). Nous parlerons alors de routinisation de l'activité.

8.2.1.3 Le réglage du compromis cognitif

Hoc et Amalberti (2007) définissent la maîtrise de la situation comme étant le principal critère qu'utilise l'opérateur pour ajuster son contrôle cognitif. La maîtrise de la situation consiste à conserver un niveau de performance acceptable pour une quantité également acceptable de ressources. Le réglage du compromis cognitif est donc le résultat du processus d'adaptation

Par exemple, un changement de véhicule peut nécessiter un léger réglage de ses automatismes du fait de la nécessité d'adapter ses interactions au nouvel habitacle. De la même façon, conduire sur simulateur peut nécessiter également une période de réglage de ses automatismes et donc d'adaptation. Ainsi, dans le modèle de Rabardel et Béguin (2005), bien que l'activité ne soit pas fondamentalement modifiée en soi lors d'un changement de véhicule, les schèmes d'usages doivent être adaptés au nouvel outil (nouvelle voiture, simulateur). Ce mécanisme adaptatif nécessite un réglage du compromis cognitif, vers un contrôle davantage symbolique, durant cette phase d'adaptation des schèmes d'usage (assimilation). Nous parlerons alors de réglage du compromis cognitif lorsque nous nous parlerons de ces variations du contrôle cognitif (Hoc & Amalberti, 2007).

De la même façon, l'ajout d'un nouveau dispositif d'aide à la conduite soulève la question du réglage du compromis cognitif du fait de l'étape nécessaire d'instrumentalisation du dispositif, c'est-à-dire de la réorganisation de l'activité du conducteur en fonction de l'action du dispositif (Rabardel & Béguin, 2005). Afin d'étudier les effets d'une assistance sur ces mécanismes adaptatifs nous utiliserons un dispositif susceptible d'interagir directement avec les automatismes, ou routines, utilisés dans le contrôle de la trajectoire.

8.2.2 Le contrôle partagé

8.2.2.1 Définition du contrôle partagé

L'assistance étudiée est appelée contrôle partagé, ou « *shared control* » dans la littérature (Abbink, Mulder & Boer, 2011; Griffith & Gillespie, 2005). Le contrôle partagé est un mode de coopération homme-machine au sens de Hoc, Young et Blosseville (2009) : deux agents, un conducteur et un automate, interfèrent (positivement ou négativement) dans la réalisation d'une tâche. Le contrôle partagé présente deux caractéristiques essentielles (De Winter & Dodou, 2011). La première est l'action commune des deux agents sur la même variable. La seconde est que l'action sur cette variable s'effectue à partir de la même commande. Dans le cas présent nous étudions un contrôle partagé du volant (la commande) afin de produire une action simultanée sur la position latérale (la variable). L'action commune signifie, *in fine*, que l'automate n'est pas conçu pour agir seul sur la trajectoire. Son action est limitée et seul un

pourcentage de l'intervention qu'elle a calculé comme étant nécessaire est appliqué sur le volant (Saleh, Chevrel, & Lafay 2010).

Les conducteurs reçoivent donc un feed-back en continu des actions de l'automate puisque ce dernier agit par l'intermédiaire du volant. En conséquence un guidage haptique découle des deux précédentes caractéristiques. Le guidage haptique est souvent utilisé. Il a produit de bons résultats, dans l'apprentissage de compétences perceptivo-motrices (Feygin, Keehner & Tendick, 2002). Dans le cadre des modes de coopération homme-machine (Hoc, Young & Blosseville, 2007), ce guidage haptique s'apparente également à du contrôle mutuel d'un agent sur l'autre dans le sens où le dispositif vient "critiquer" les actions du conducteur lorsqu'il s'écarter de la trajectoire idéale (précédemment calculée par la machine). On peut donc envisager que le dispositif, éventuellement par conditionnement, amène le conducteur à s'écarter le moins possible de la norme, car cet écart nécessiterait la gestion d'interférences avec le dispositif.

Le réglage que nous utilisons dans cette expérimentation est décrit précisément dans Deroo, Mars & Hoc (2012). Il correspond à un pourcentage de l'intervention nécessaire de 11%. Ce réglage offre le meilleur compromis entre gains de performance, confort et sentiment de maîtrise de la situation.

8.2.2.2 Les effets de l'assistance sur les mécanismes adaptatifs

Le dispositif de contrôle partagé agissant sur les boucles de contrôle sensori-moteur il nous semble particulièrement intéressant pour étudier les mécanismes adaptatifs. La question est de découvrir en quoi les routines des conducteurs peuvent être modifiées ou non par la pratique prolongée du contrôle partagé. Plus précisément, il s'agit de cerner si les mécanismes adaptatifs en jeu consistent principalement en une assimilation de la nouvelle situation aux schèmes existants ou si une accommodation des schèmes existants s'avère aussi nécessaire pour faire face à la nouvelle situation de contrôle partagé.

Trois niveaux d'analyses vont ainsi être distingués dans cet article. Le premier niveau consiste à étudier les effets que la pratique du contrôle partagé provoque, en situation nominale de conduite, sur la variable directement contrôlée par le dispositif (le positionnement latéral). Un deuxième niveau d'analyse consiste à étudier, toujours en situation nominale de conduite, les effets que la pratique du contrôle partagé peut avoir sur l'autre dimension de la génération de trajectoire, à savoir la vitesse. Enfin un troisième niveau d'analyse consiste à étudier les effets que la pratique de cette assistance à la conduite va avoir sur les trajectoires lors de situations dites critiques. Nous faisons en effet l'hypothèse qu'une adaptation due à la pratique prolongée du dispositif peut être présente en situation de conduite nominale ou lors de la survenue d'événements imprévus.

8.2.3 Le contrôle de la trajectoire en situation nominale de conduite

8.2.3.1 Le contrôle latéral

L'une des deux dimensions du guidage du véhicule est le contrôle latéral. La deuxième est le contrôle longitudinal. Le contrôle latéral est la variable directement contrôlée par le dispositif de contrôle partagé que nous avons étudié. Cette variable est souvent utilisée pour évaluer la performance de conduite. Par exemple une augmentation de la variabilité de l'écart latéral a déjà été prouvée lors de l'utilisation d'un téléphone cellulaire (Salvucci, 2001) ou du fait de l'augmentation de la fatigue au volant (Philip et al., 2003). Cette augmentation correspond ici à une dégradation de la performance. A l'inverse, il est fréquent d'associer réduction de la variabilité de l'écart latéral avec gain de performance en conduite. Par exemple, une étude sur l'exploration visuelle de l'environnement en situation de double tâche a montré une réduction

de l'écart latéral pour des conducteurs expérimentés par comparaison avec des conducteurs plus novices (Wikman, Nieminen & Summala, 2010).

La variabilité de la position dans la voie est donc un indicateur souvent choisi pour évaluer la performance de conduite et quel que soit le facteur influençant la conduite. Nous avons déjà montré (Deroo, Mars & Hoc, 2012) que le dispositif étudié diminue significativement la variabilité de l'écart latéral. Nous en avons donc conclu que la performance de conduite est augmentée avec ce dispositif. Une question qui se pose est alors de savoir si la réduction de la variabilité de l'écart latéral opérée par le dispositif est cumulative avec une réduction produite par le développement de l'expérience, ou si au contraire, ces gains sont exclusifs les uns des autres ? Autrement dit, il s'agit de savoir s'il est possible de continuer à améliorer sa performance de conduite, malgré les gains déjà produits par le dispositif. On ne peut pas exclure en effet que le gain de performance produit par le dispositif, conduise à une sorte d'effet plafond sur la performance, qui ne permettrait pas aux conducteurs de continuer à améliorer le contrôle de la trajectoire.

8.2.3.2 Le contrôle longitudinal

La deuxième dimension du guidage du véhicule est le contrôle longitudinal, qui consiste en la gestion de la vitesse du véhicule en fonction de contraintes imposées à la fois par l'infrastructure routière (état et géométrie de la route), par les autres usagers (trafic) et par la signalisation routière (limitations de vitesse). Cette dimension n'est pas matériellement affectée par le contrôle partagé. Toutefois une modification de l'activité de conduite pourrait amener le conducteur à modifier cette dimension. Par exemple, d'après les théories sur l'homéostasie du risque (Wilde, 1982), le conducteur pourrait rouler plus vite pour compenser la baisse de risque apporté par le dispositif dans le contrôle latéral et ainsi maintenir constant le niveau de risque total.

8.2.4 Le contrôle de la trajectoire lors d'évènements critiques

8.2.4.1 Modèles internes et after-effect

Dans le cadre de l'étude des processus sensori-moteurs, les auteurs parlent de théorie des modèles internes (Deborne, 2009) nous semble adaptée pour étudier les processus d'adaptation sensori-motrice. Cette théorie postule le développement de représentations des caractéristiques dynamiques des mouvements en fonction des informations fournies par les récepteurs sensoriels. Ces modèles sont utilisés dans le contrôle de l'action et permettent d'anticiper les résultats des actions.

L'un des principaux marqueurs de ces modèles internes sont ce qui est couramment nommé *after-effect*. Des recherches menées sur la façon dont le système nerveux central apprend à contrôler un mouvement indiquent que, lorsque l'être humain est confronté de façon répétée à des forces motrices, des phénomènes d'adaptation apparaissent quand ces forces sont soudainement retirées (Forsyth & MacLean, 2006 ; Shadmehr & Brashers-Krug, 1997). A titre d'illustration, les travaux de Held (1965) représentent une étape importante dans la mise en évidence expérimentale de l'adaptation sensori-motrice par apprentissage. Dans cette expérimentation, une tâche de pointage était proposée. Cette tâche était parfaitement réalisée, après plusieurs essais, malgré le port de lunettes prismatiques, qui décalent la scène visuelle d'un angle constant. Une fois ces lunettes retirées, les sujets manquaient la cible avec un écart de valeur identique mais dans le sens contraire à celui qui avait été observé lors des premiers essais avec le port des lunettes. Cet effet a ensuite été reproduit avec toutes sortes de dispositifs, agissant par exemple sur la modalité visuelle (Gray & Regan, 2000) ou haptique (Emken, et al. 2007)). Ce phénomène appelé *after-effect* est le marqueur d'un processus

d'adaptation qui a été précédemment réalisé, il caractérise la construction ou la modification d'un modèle interne de la relation entre la commande motrice et le résultat de l'action (Deborne, 2009).

Ainsi, pour le psychologue, l'*after-effect* peut être considéré comme un indicateur révélant la présence d'une adaptation, par la mise à jour d'un modèle interne. Pour la personne c'est un indicateur de désadaptation et la condition de la réadaptation qui suivra par la nouvelle mise à jour du modèle interne à la nouvelle situation.

8.2.4.2 Les événements critiques étudiés

Dans le cadre du contrôle partagé, les effets directs sur la trajectoire, couplés aux effets de guidage haptique, devraient ainsi conduire à un phénomène d'adaptation qui devrait être observé par la présence d'un *after-effect* lors du désengagement soudain du contrôle partagé.

Au delà d'adaptations constatées dans la génération de trajectoires en situations nominales de conduite, la pratique du contrôle partagé soulève, en effet, des questions pour plusieurs cas d'événements critiques. Deux cas ont retenu notre attention. Le premier niveau est celui de la survenue d'événements critiques durant lesquels le conducteur doit effectuer une manœuvre imprévue et non gérée par le dispositif. Ce qui peut être le cas lors d'un contournement d'urgence, autrement dit une reprise en main totale par le conducteur afin de générer une trajectoire non prévue par le dispositif. Un deuxième cas correspond à une situation dans laquelle le dispositif est subitement inopérant alors qu'il est censé être opérationnel. Ce cas correspond à la situation classique de défaillance.

Dans ces deux situations critiques, le dispositif est donc inopérant et ce qui les distingue est le fait que dans un cas le conducteur est averti et conscient de ce désengagement (contournement) alors que dans l'autre cas il n'en est pas averti (défaillance). L'observation d'un *after-effect* pourra alors être considérée comme un indicateur pertinent pour identifier l'élaboration d'un modèle interne de la direction intégrant l'action de l'automate sur la commande.

8.2.5 Les objectifs de l'étude

L'hypothèse principale est que les mécanismes adaptatifs produiront des modifications dans les routines de guidage du véhicule lors d'une conduite prolongée avec le contrôle partagé. Il s'agira alors de détecter ces modifications et de préciser si l'usage du dispositif et la pratique prolongée ont des effets d'interactions, des effets additifs ou des effets exclusifs sur la génération des trajectoires. Cette étude étant exploratoire nous n'avons pas d'hypothèse forte sur le sens des mécanismes adaptatifs. Nous allons donc chercher à étudier s'ils sont similaires, qu'il y ait assistance ou non. Dans le cas contraire, s'ils sont différents, il s'agira de découvrir s'ils conduisent à une amélioration ou une dégradation de la performance.

Deux axes de recherche seront considérés. Le premier axe cherchera à mesurer l'effet du dispositif sur les trajectoires produites par le système homme-machine dans le cadre de situations nominales. Ces trajectoires seront décrites en termes de positionnement latéral (matériellement affecté par le dispositif), mais également en termes de vitesse (non affecté matériellement par le dispositif).

Nous étudierons ensuite le cas particulier des situations critiques en confrontant les conducteurs à deux types de situations critiques. Le premier type correspondra à un contournement et le second type sera une défaillance soudaine et imprévue du dispositif.

8.3 Méthode

8.3.1 Participants

Un total de 24 conducteurs (21 hommes, 3 femmes, 31 ans de moyenne d'âge) ont participé à cette étude. Ils avaient tous leur permis de conduire depuis au moins 3 ans (moyenne = 12 ans). Par auto-évaluation, les distance parcourues annuellement allaient de 1 000 à 30 000 Km (moyenne = 12 270 Km). Aucun conducteur n'était familier avec un système d'aide au maintien dans la voie. Enfin, aucun conducteur n'a été malade au point de devoir annuler l'expérimentation.

8.3.2 Simulateur

L'étude a pris place dans un simulateur à base fixe. Ce simulateur est équipé d'un volant à retour d'effort réaliste. Le logiciel SCANNeR^{II}⁵ est utilisé avec un modèle dynamique de véhicule (Lechner et al. 1997). L'environnement visuel est rendu sur trois moniteurs LCD de 32 pouces. Le premier est positionné en face du conducteur et les deux autres sont positionnés sur les côtés, à un angle de 45° par rapport à l'écran central. Les conducteurs étaient installés à environ 1 mètre de l'écran central et la scène visuelle couvrait 115° d'angle visuel en largeur et 25° en hauteur.

8.3.3 Conception du plan d'expérience

Afin de réduire l'effet de la fatigue deux rendez-vous ont été nécessaires pour chacun des conducteurs. Le premier rendez-vous (1h30) comprenait une phase de familiarisation, un test (événements critiques) et la moitié des tours de pratique. Le second rendez-vous (1h) comprenait, quant à lui, la seconde moitié des tours de pratique et le retest (événements critiques). Nous présenterons d'abord le circuit et les consignes de la phase de pratique puis ceux du test-retest.

8.3.3.1 Circuit familiarisation et phase de pratique

Le circuit utilisé durant la phase de pratique (ainsi que celle de familiarisation) correspondait à un parcours d'environ 4,3 Km (Figure 33A). L'essentiel du circuit était limité à 90 Km/h, avec deux exceptions (zones entourées de pointillés dans la figure 33A) qui correspondaient à une conduite en agglomération (en haut du circuit) ou au croisement d'une intersection (en bas) et nécessitaient de respecter une vitesse plus réduite. Un tour complet de circuit prenait environ 3 min 30 de conduite.

Un trafic été simulé afin d'inciter les conducteurs à rester dans leur voie (3-4 voitures / minute). Le trafic était constitué uniquement de voitures venant dans le sens opposé au conducteur afin de ne pas confronter les conducteurs à des situations de dépassement.

Durant la phase de familiarisation les conducteurs ont tous conduit sans assistance. Ce premier tour nous permettait de vérifier l'homogénéité de nos groupes de conducteurs. Durant la phase de pratique (12 tours de circuits) les conducteurs étaient ensuite été divisés en deux groupes et devaient conduire les 12 tours soit sans assistance, soit avec l'assistance.

La seule consigne pour les 12 tours de pratique ainsi que pour la familiarisation était de respecter les limitations de vitesse.

⁵ <http://www.scanersimulation.com/>

8.3.3.2 Phase test-retest

Le circuit utilisé durant les événements critiques (test-retest) correspondait à un parcours d'environ 2,5 Km (Figure 33B). Les conducteurs avaient pour consigne d'y conduire à 70 Km/h (des indicateurs dans la scène visuelle les aidaient à respecter cette consigne). Un trafic été également simulé afin d'inciter les conducteurs à rester dans leur voie (2-3 voitures / minute). De la même façon, les voitures ne venaient que du sens opposé.

Avant et après cette phase de pratique plusieurs tours, sur un autre circuit, correspondaient à ce que nous appellerons le *test-retest*. Durant le test-retest tous les conducteurs ont été confrontés (avec et sans assistance) à différents scénarios expérimentaux (conduite nominale, conduite avec brouillard et exigence visuelle). Le scénario exigence visuelle consistait à afficher la scène visuelle durant une seconde à chaque pression sur les essuie-glaces ; sans cette action les écrans restaient noirs.

Durant le test-retest, les conducteurs ont également été confrontés aux situations critiques. La première situation critique, appelée contournement était proposée en test et en retest. La deuxième situation critique, appelée défaillance, n'a été proposée qu'à la fin du retest, pour ne pas affecter la confiance que les conducteurs établissaient envers le dispositif. Enfin, les résultats à présenter étant nombreux, nous avons fait le choix de présenter les données les plus pertinentes. Nous présenterons donc uniquement les données sur les situations critiques pour la phase test-retest.

Durant les scénarios contournement le circuit été plongé dans le brouillard (visibilité réduite à 50 m). Le conducteur, prévenu qu'un véhicule stationné en bord de voie pouvait être présent dans le circuit, devait contourner cet obstacle lorsqu'il se présentait, sans freiner, et en poursuivant ensuite sa route. Il était précisé qu'aucun véhicule venant en sens inverse ne se présenterait dans ces situations et que les capteurs, utilisés par l'assistance, identifiaient un obstacle et, de ce fait, ne gênaient pas les manœuvres de changement de voie.

Le scénario défaillance consistait à demander aux conducteurs de faire un dernier tour de circuit (dernier scénario de l'expérimentation) avec l'assistance activée et dans des conditions de bonne visibilité. Sans que ces derniers ne soient prévenus, l'assistance devenait inactive à partir d'un certain point (cf. Figure 33B). Quelques mètres après la survenue de cette défaillance, en ligne droite, survenait un virage à droite.

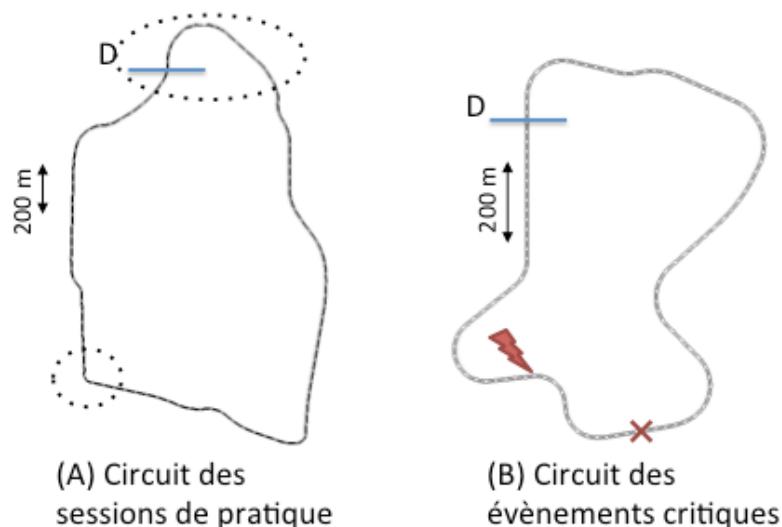


Figure. 33. La figure (33A) représente le tracé du circuit utilisé lors des sessions de pratique. Les zones entourées de pointillés sont d'une part une zone urbaine (en haut), une zone avec

intersection (en bas). Ces zones ont été retirées des analyses statistiques. La figure 33B) représente le tracé du circuit utilisé lors de la survenue d'événements critiques. L'éclair représente l'endroit où est survenue la défaillance et la croix représente l'endroit où était situé le contournement. Les D représentent les points de départ des circuits, qui étaient parcourus dans le sens contraire des aiguilles d'une montre.

8.3.4 Données mesurées

8.3.4.1 Mesures lors de la phase de pratique

Durant les sessions de pratique, les données recueillies durant la traversée de zone rurale ainsi que celle de l'intersection ont été retirées afin d'analyser uniquement des données comparables en termes de conduite. Cela nous permettait ainsi d'éliminer les interférences possibles en termes d'attente (liées au trafic) et de variabilité de la vitesse. Toutes les données ont été enregistrées à 20 Hz.

Le premier indicateur utilisé pour résumer la trajectoire est la variabilité de l'écart latéral. Nous avons procédé en prenant l'écart type de l'écart latéral pour chacun des tours réalisés.

Le deuxième indicateur utilisé pour résumer la trajectoire est la vitesse. Nous avons procédé en prenant la moyenne de la vitesse pour chacun des tours réalisés.

Enfin, tous les 2 tours de circuit (familiarisation non-incluse) une petite pause a été proposée. Durant cette pause il était demandé au conducteur d'évaluer « *le temps qu'il avait passé à penser à autre chose que la conduite* ». Cet indicateur a été utilisé comme une mesure du désengagement du contrôle symbolique de la tâche de conduite.

8.3.4.2 Mesures lors des événements critiques

Deux variables ont été mesurées afin de quantifier la performance pour les contournements. Le premier indicateur a été le temps de réaction. Ce temps a été mesuré en fonction de la durée séparant l'apparition du véhicule à contourner dans la scène visuelle du début de la réponse motrice (rotation du volant). Il correspondait à la rapidité de la réaction du conducteur.

Le second indicateur mesurait l'écart latéral maximum durant le contournement, par rapport au centre de la voie. Cet indicateur nous permettait de quantifier l'importance de l'écart de trajectoire. Bien que les conducteurs aient été informés de l'absence de trafic durant le contournement, l'évitement se faisant dans une situation avec brouillard nous prenons, de ce fait, le parti de décrire une augmentation de la performance comme une réduction de l'écart latéral. Un écart latéral important correspond en effet à une réaction exagérée.

Durant la défaillance une seule mesure a été réalisée. Afin de quantifier la dégradation de la performance, nous avons enregistré l'écart latéral maximum durant le virage suivant immédiatement la défaillance.

8.3.5 Analyse des données

Les effets des facteurs ont été analysés pour toutes les variables à l'aide de mesures répétées d'ANOVA. De plus, la taille des effets a été évaluée en se basant sur l'inférence fiduciaire. L'inférence fiduciaire (Rouanet and Lecoutre 1983, Rouanet 1996, Lecoutre and Poitevineau 2005) est une variante de l'inférence statistique bayésienne qui consiste à conclure sur la taille de l'effet dans la population (δ) sur la base de l'effet observé (d), la taille de l'échantillon et sa variabilité. L'inférence fiduciaire va donc au delà du test de signification qui conclut uniquement sur l'existence d'un effet non nul. Dans cet article, nous concluons sur la taille

de l'effet en utilisant une garantie de .90. Par exemple " $\delta > 20$ " signifie que "la probabilité que δ soit plus grand que 20 est de .90".

Pour l'analyse des données les plans d'analyses statistiques suivants ont été utilisés : ($S_2 < G_6 * P_2 > * R_{13}$) pour les sessions de pratique et ($S_2 < G_6 * P_2 >$) pour les événements critiques ; avec S : sujet, G : groupe pour le contrebalancement, P : type de pratique (avec ou sans assistance), R : rang de la pratique (le tour de familiarisation étant inclus dans R).

8.4 Résultats

Que ce soit pour la variabilité de l'écart latéral (Figure 34), ou pour la vitesse (Figure 35), les analyses statistiques ont été découpées en deux parties. La première partie consiste à étudier le cas spécifique de la phase de familiarisation. La deuxième partie des analyses est réalisée uniquement sur les tours de pratiques (r1 à r12).

Pour rappel, durant la phase de familiarisation tous les conducteurs conduisent sans assistance. La comparaison Fam - R1 consiste donc à étudier l'effet immédiat de l'assistance. Ensuite les comparaisons dans R1 – R12 consistent à étudier l'effet de la pratique sur l'utilisation, ou non, d'une assistance.

8.4.1 Phase de pratique : contrôle latéral

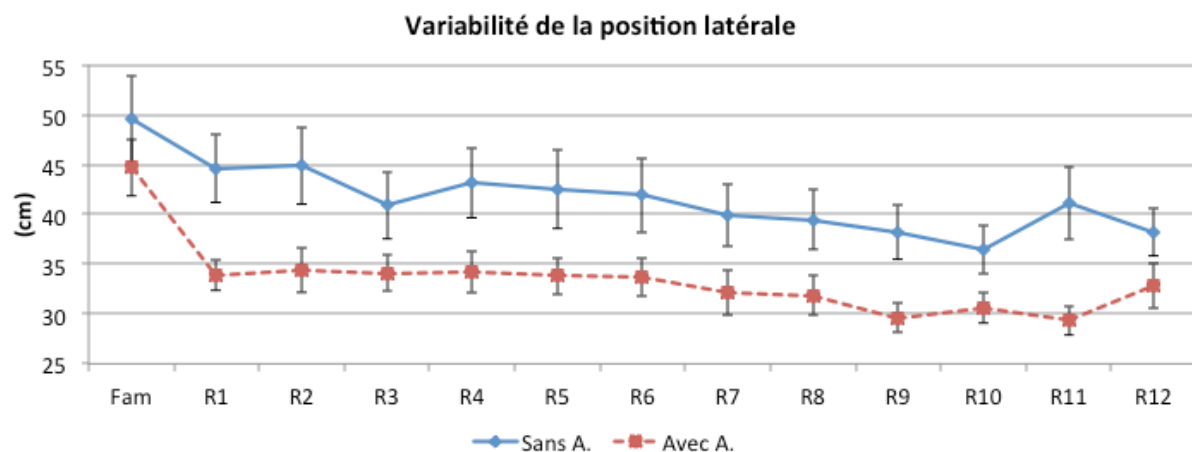


Figure. 34. Variabilité de la position latérale en fonction du rang et du type de pratique. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Tableau 14 - Analyses réalisées sur la variabilité du contrôle latéral.

Variable	Comparaison	d	Bayésien	Test	LoS
Variabilité de la position latérale (Fam-R1)	P/Fam	d=4.96	$ \delta < 11.50$	t(12)=1.04	p=0.32
	P.(Fam-R1)	d=5.71	$\delta > 1.40$	t(12)=1.80	p=0.10
Variabilité de la position latérale (R1-R12)	P	d=8.39	$\delta > 4.48$	t(12)=2.91	p=0.01*
	Lin R	d=0.49	$\delta > 0.31$	t(12)=3.63	p=0.01*
	-Lin R	l=0.94		F(10,120)=1.63	p=0.11
	Lin R.P	d=0.21	$ \delta < 0.59$	t(12)=0.76	p=0.46

Note: P: type de pratique (p1=sans assistance, p2= avec assistance); R: rang de la session de pratique (Fam= familiarisation; R1=rang 1).

La première étape consiste à vérifier l'homogénéité des deux groupes de conducteurs lors de la phase de familiarisation (Tableau 14). Il n'y a pas de différence significative ($p=0.32$) entre les deux groupes. Bien que cette différence ne puisse être décrite comme étant petite ($|\delta| < 11.50$) nous considérerons tout de même que les conducteurs étaient à peu près homogènes sur la variable variabilité de la position latérale lors d'une première prise en main du simulateur.

Entre la phase de familiarisation et les sessions de pratique il y a pas d'interaction significative selon le type de pratique ($p=0.10$), mais cette différence est non négligeable ($\delta > 1.40$).

Ensuite, en excluant la phase de familiarisation nous pouvons étudier les effets de la pratique ainsi que du type de pratique. La différence la plus visible est celle d'un effet de l'assistance. Conduire avec le contrôle partagé réduit la variabilité de l'écart latéral ($\delta > 4.48$). Nous avons ensuite analysé l'effet de la pratique par une régression linéaire. L'interaction non significative et peu élevée entre le type de pratique et la pente de régression linéaire ($|\delta| < 0.59$) nous conduit à étudier l'effet principal de la pratique, sans prendre en compte le type de pratique. L'inférence sur la pente de la régression linéaire de l'effet de la pratique est significative ($\delta > 0.31$). De plus, la dispersion des données autour de la droite de régression n'est pas significative ($p=0.11$).

Enfin, pour conclure sur la variabilité de la position latérale, bien que descriptivement nous observons des erreurs types plus réduites pour le groupe pratiquant avec assistance il ne nous est pas possible de borner ces effets par l'inférence fiduciaire.

Ainsi pour résumer, tous les conducteurs bénéficient des sessions de pratique et diminuent la variabilité de leur écart latéral, qu'ils conduisent avec ou sans assistance. L'effet de la pratique et du type de pratique sont donc additifs. Enfin, le contrôle partagé homogénéise les conducteurs entre eux (réduction de l'erreur type de la variabilité de l'écart latéral pour la conduite avec assistance).

8.4.2 Phase de pratique : contrôle longitudinal

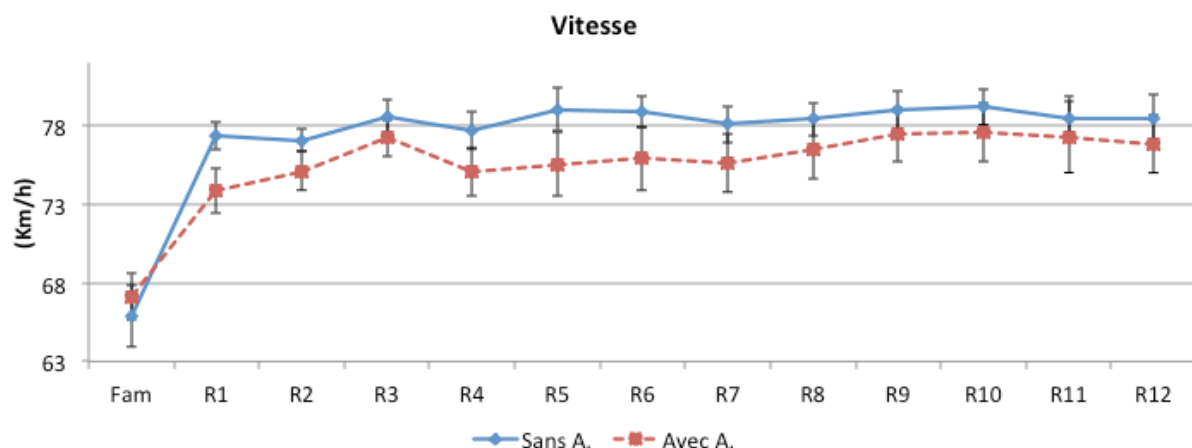


Figure. 35. Vitesse moyenne en fonction du rang et du type de pratique. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Tableau 15 - Analyses réalisées sur le contrôle longitudinal.

Variable	Comparaison	d	Bayésien	Test	LoS
Vitesse (Fam-R1)	P/Fam	d=1.25	$ \delta < 5.35$	t(12)=0.45	p=0.66
	P.(Fam-R1)	d=4.73	$\delta > 2.74$	t(12)=3.22	p=0.01*
	P	d=2.20	no gen.	t(12)=2.14	p=0.33
Vitesse (R1-R12)	Lin R	d=0.18	$ \delta < 0.29$	t(12)=1.96	p=0.05*
	-Lin R	l=0.55		F(10,120)=1.96	p=0.04*
	Lin R.P	d=0.12	$ \delta < 0.36$	t(12)=0.73	p=0.48

Note: P: type de pratique (p1=sans assistance, p2= avec assistance); R: rang de la session de pratique (Fam= familiarisation; R1=rang 1).

De la même façon que pour les analyses précédentes nous analysons tout d'abord les résultats en prenant en compte la phase de familiarisation (Tableau 15). Comme pour le variabilité précédente (variabilité de l'écart latéral), il n'y a pas de différence significative entre les groupes durant cette phase (p=0.66). Ainsi, comme pour la vitesse, les conducteurs semblent à peu près homogènes sur la variable de vitesse durant le tour de familiarisation.

Entre la phase de familiarisation et le premier tour de pratique il y a un effet d'interaction en fonction du type de pratique ($\delta > 2.74$). Dans l'ensemble, tous les conducteurs conduisent plus vite (ils se sont familiarisés avec le circuit et avec le simulateur), mais cette augmentation est plus faible pour les conducteurs conduisant avec le contrôle partagé.

Ensuite, lorsque l'on s'intéresse à l'ensemble de la phase de pratique nous constatons que le type de pratique n'a pas d'effet significatif sur la vitesse (p=0.33). Ainsi, l'interaction négligeable entre le type de pratique et la régression linéaire ($|\delta| < 0.36$) nous conduit à étudier l'effet principal de la pratique, sans prendre en compte le type de pratique. La régression linéaire est significative mais avec une pente plutôt faible $|\delta| < 0.29$. De plus, la dispersion des données autour de la droite de régression est significative (p=0.04).

Pour résumer, tous les conducteurs bénéficient des sessions de pratique et augmentent la vitesse, mais de façon très limitée. De plus, le type de pratique ne semble pas différencier les conducteurs entre eux, à l'exception du premier tour de pratique, durant lequel les conducteurs avec assistances conduisent un peu moins vite que les conducteurs sans assistance.

8.4.3 Phase de pratique : désengagement du contrôle symbolique

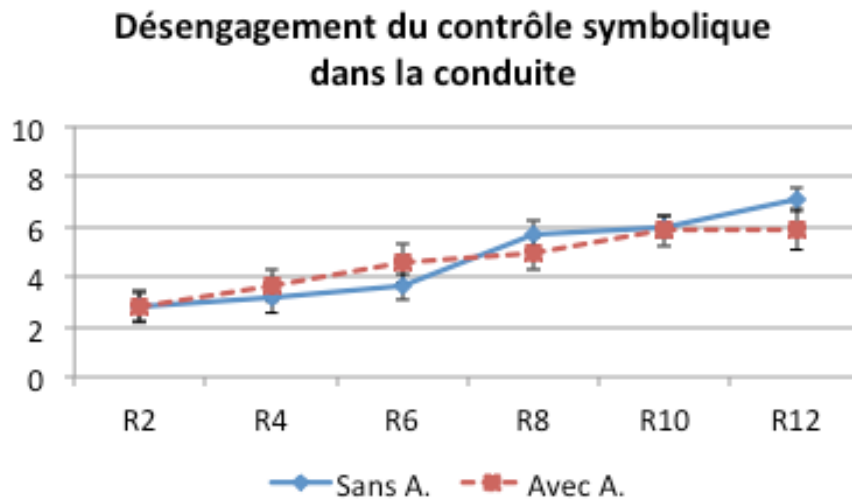


Figure. 36. Auto-évaluation à propos du désengagement du contrôle symbolique dans la tâche de conduite en fonction du rang et du type de pratique. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Tableau 16 - Analyses réalisées sur le questionnaire.

Variable	Comparaison	d	Bayésien	Test	LoS
Désengagement du contrôle symbolique	P	d=0.10	$ \delta < 0.90$	t(12)=0.21	p=0.84
	Lin R	d=0.77	$\delta > 0.54$	t(12)=4.43	p=0.01*
	-Lin R	l=0.15		F(4,48)=0.24	p=0.91
	Lin R.P	d=0.27	$ \delta < 0.76$	t(12)=0.77	p=0.45

L'auto-évaluation, à propos du désengagement du contrôle symbolique de la tâche de conduite (Tableau 16, Figure 36), ne présente pas de différence significative en fonction du type de pratique (p=0.84). En revanche, la droite de régression linéaire en fonction du rang de la pratique est significative et sa pente est notable ($\delta > 0.54$). Le désengagement semble très progressif et donc réalisé de façon linéaire. La dispersion autour de cette pente n'est pas significative (p=0.91). Enfin il n'y a pas d'interaction significative entre rang et type de pratique.

8.4.4 Evènements critiques : contournement

Tout d'abord, aucune collision n'a été constatée durant les contournements. Toutes les trajectoires sont donc acceptables, par contre nous interpréterons un écart très important comme une réaction trop violente et peu maîtrisée, signe d'une sur-réaction. Nous présentons les résultats selon le type de conduite précédent le contournement (Figure 37). Les conducteurs ont conduit, en effet, soient sans assistance, soit avec assistance activée (bien que l'assistance se désactivait au moment du contournement).

Il s'agira de bien faire la distinction entre le type de conduite lors du contournement et le type de pratique que les conducteurs ont exercé durant la phase de conduite prolongée, car dans les deux cas les modalités sont avec et sans contrôle partagé.

Descriptivement les résultats semblent être parfaitement inversés selon la condition de conduite durant la contournement. Ainsi nous distinguons une diminution de la position latérale maximum pour le groupe ayant pratiqué sans assistance lorsqu'il est en situation de contournement durant la conduite sans assistance. A l'inverse, nous distinguons une diminution de la position latérale maximum pour le groupe ayant pratiqué avec assistance lorsqu'il est en situation de contournement durant la conduite avec assistance.

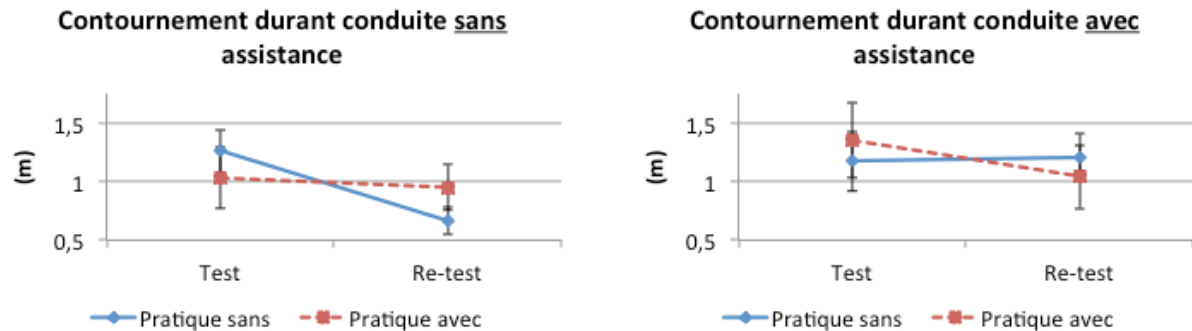


Figure. 37. Position latérale maximum durant le contournement (sans assistance à gauche et avec assistance à droite).

8.4.4.1 Contournement opéré durant la conduite SANS assistance

Tableau 17 - Contournement durant la conduite sans assistance.

Training	Test	Retest	Progrès	Bayésien	Test	LoS
TR P. sans A.	0.64	0.58	+0.06	$ \delta < 0.12$	$t(6)=1.51$	0.18
TR P. avec A.	0.66	0.58	+0.08	$ \delta < 0.14$	$t(6)=1.97$	0.10
PL max P. sans A.	1.26	0.66	+0.60	$\delta > 0.35$	$t(6)=3.62$	0.01*
PL max P. avec A.	1.03	0.95	+0.08	$ \delta < 0.31$	$t(6)=0.58$	0.58

Note: TR= temps de réaction; PL= position latérale; P.= pratique; TR P. sans A. signifie : temps de réaction pour les conducteurs ayant conduit sans assistance durant la phase de pratique.

Le tableau 17 présente les résultats du contournement lorsque les conducteurs conduisaient sans assistance. La première information est que les conducteurs réagissent un peu plus vite durant le retest en comparaison avec le test. Toutefois cette différence est négligeable pour les deux groupes de sujets ; c'est-à-dire que ce soit pour les conducteurs ayant pratiqué sans l'assistance ($|\delta| < 0,12$) ou avec l'assistance ($|\delta| < 0,14$).

La deuxième information, plus intéressante, montre que les conducteurs ayant pratiqué sans assistance réduisent significativement leur écart latéral maximum durant le contournement entre le test et le retest ($\delta > 0.35$). A l'inverse, les conducteurs ayant conduit longtemps avec le dispositif ne diminuent pas significativement cet écart entre le test et le retest ($p=0.58$).

8.4.4.2 Contournement opéré durant la conduite AVEC assistance

Tableau 18 - Contournement durant la conduite avec assistance.

Training	Test	Retest	Progrès	Bayésien	Test	LoS
TR P. sans A.	0.67	0.60	+0.07	$ \delta < 0.22$	$t(6)=0.80$	0.45
TR P. avec A.	0.65	0.64	+0.01	$ \delta < 0.06$	$t(6)=0.40$	0.70
PL max P. sans A.	1.17	1.21	-0.03	$ \delta < 0.25$	$t(6)=-0.28$	0.79
PL max P. avec A.	1.35	1.04	+0.31	no gen.	$t(6)=1.03$	0.34

Note: TR= temps de réaction; PL= position latérale; P.= pratique; TR P. sans A. signifie : temps de réaction pour les conducteurs ayant conduit sans assistance durant la phase de pratique.

Le tableau 18 présente des analyses identiques à celle menées précédemment mais pour le contournement avec dispositif d'assistance enclenché quelques secondes auparavant. De la même façon que précédemment, les conducteurs réagissent un peu plus vite durant le retest en comparaison avec le test. Toutefois cette différence est négligeable pour les deux groupes de sujets ; c'est-à-dire que ce soit pour les conducteurs ayant pratiqué sans l'assistance ($|\delta| < 0,22$) ou avec l'assistance ($|\delta| < 0,06$).

La deuxième information, plus intéressante, montre qu'aucun des groupes de conducteur n'a progressé dans le contournement lorsque l'assistance était active. Les conducteurs ayant conduit longtemps avec l'assistance semblent présenter un léger progrès (+0.31) mais ce progrès n'est pas significatif et ne peut être généralisé ($p=0.34$).

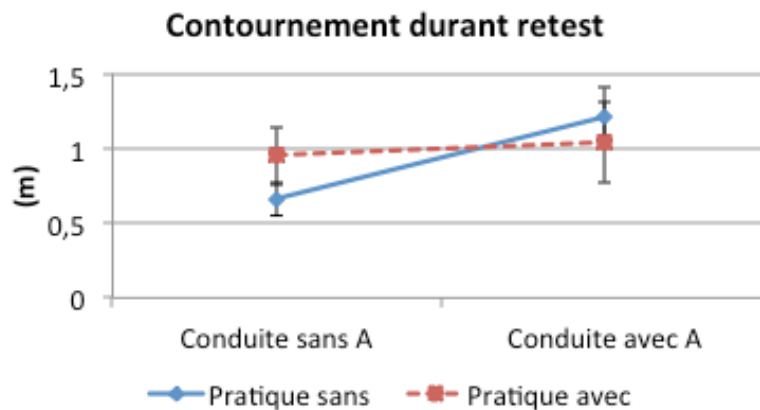


Figure. 38. Position latérale maximum durant le contournement pour le retest uniquement. Cette figure regroupe donc des informations des 2 graphiques de la figure 37 en ne se centrant que sur le retest.

Tableau 19 - Comparaisons basées sur le retest en fonction de la condition de conduite et du type de pratique réalisée.

Training	Conduite sans A.	Conduite avec A.	Progrès	Bayésien	Test	LoS
PL max P. sans A.	0.66	1.21	-0.55	$\delta < -0.27$	$t(6)=2.93$	0.03*
PL max P. avec A.	0.95	1.04	-0.09	no gen.	$t(6)=0.53$	0.61

PL= position latérale; P.= pratique; PL max P. sans A. signifie : position latérale maximum pour les conducteurs ayant conduit sans assistance durant la phase de pratique.

Enfin, si l'on ne s'intéresse qu'au retest (Tableau 19, Figure 38), certaines informations intéressantes peuvent être mises en avant dans l'analyse des données.

Les conducteurs ayant pratiqué une conduite sans assistance présentent une dégradation nette de leur performance lorsqu'ils conduisent avec assistance en comparaison de quand ils conduisent sans assistance ($\delta < -0.27$). A l'inverse les conducteurs ayant pratiqué le contrôle partagé ne présentent pas de différence de trajectoire significative en retest, qu'ils conduisent avec ou sans assistance ($p=0.61$).

8.4.5 Evènements critiques : défaillance

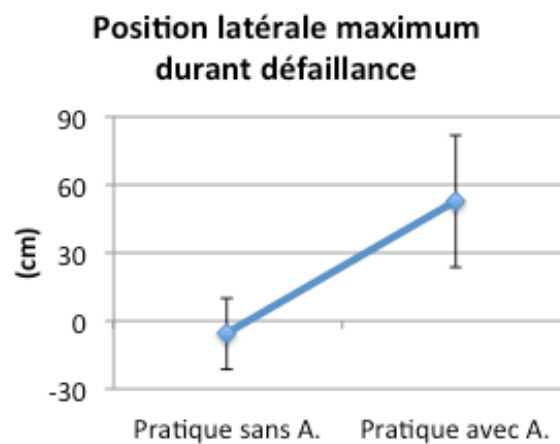


Figure. 39. Position latérale maximum durant la défaillance. Les barres d'erreur représentent les erreurs moyennes.

Tableau 20 - Analyses réalisées sur la défaillance.

Training	Pratique sans A.	Pratique avec A.	d	Bayésien	Test	LoS
Déviation max.	-5	53	+0.58	$\delta > 33$	$t(12)=3.31$	0.01*

Sur la figure 39, le 0 correspond au milieu de la voie pour le milieu du véhicule. Pour rappel, le virage durant lequel survient la défaillance est un virage à droite. Enfin, un écart latéral négatif correspond à une position vers la droite de la voie.

Ainsi, durant le virage, la tendance naturelle à redresser les trajectoires, pousse les conducteurs à naturellement déporter le véhicule vers la droite (écart latéral négatif). De ce fait un écart latéral positif et important correspond à un redressement tardif (voir à l'absence de redressement) de la trajectoire.

Pour rappel, lors de la défaillance tous les conducteurs sont dans la même condition de conduite avec assistance. Ainsi, nous constatons que les conducteurs ayant longuement conduit avec le dispositif durant la phase de pratique ont produit un écart latéral maximum significativement plus important que le groupe de conducteurs ayant effectué la phase de pratique sans assistance ($\delta > 33$ cm ; tableau 20). En considérant la largeur de la route ainsi que celle du véhicule, la sortie de voie en sous virage se fait à 75 cm. En moyenne les conducteurs ne sont donc pas sortis de leur voie, mais ont dégradé fortement leur performance lors de la prise de ce virage.

8.5 Discussion

Dans Deroo, Mars & Hoc (2012), nous avons distingué les effets de différents degrés de partage à partir d'indicateurs comportementaux ainsi que de trajectoires. Nous avons identifié un degré optimal de contrôle partagé, produisant des gains en termes de performance dans le contrôle de la trajectoire, d'augmentation du sentiment de confort, de sécurité et de maîtrise de la situation. Dans cet article, nous nous intéressons aux effets qu'une pratique prolongée de ce réglage optimal peut avoir sur le conducteur et sur l'activité de conduite. Cette étude exploratoire cherche donc à identifier les conséquences de l'usage prolongé d'un contrôle partagé en termes de mécanismes adaptatifs.

Les résultats que nous avons présentés nous permettent de discuter de l'effet que la pratique d'un dispositif de type contrôle partagé peut avoir sur l'activité de conduite, que ce soit en situation de conduite nominale ou en situation critique. Nous allons discuter ces résultats en commençant par nous intéresser au processus de routinisation de l'activité. Nous discuterons ensuite de la problématique de l'homéostasie du risque. Puis nous aborderons la question de la mise à jour d'un modèle interne de la direction intégrant l'intervention du contrôle partagé. Enfin, dans la dernière partie, nous aborderons les limites de cette étude en discutant du rôle que l'expertise de conduite et que la familiarisation avec le circuit pourraient jouer dans l'effet de la pratique prolongée du contrôle partagé.

8.5.1 Routinisation de l'activité de guidage de la trajectoire

Les résultats que nous observons tendent à démontrer que la routinisation de l'activité se déroule strictement de la même façon, que le contrôle partagé soit présent ou non. Les résultats montrent des effets additifs sur la variabilité de l'écart latéral entre effets de la pratique (conduite prolongée) et type de pratique (avec ou sans assistance). De plus, le désengagement du contrôle symbolique est aussi rapide avec ou sans assistance. Sur l'axe symbolique-subsymbolique du contrôle cognitif il ne semble donc pas y avoir d'effet du type de pratique sur le réglage du compromis cognitif. Cela signifie donc que la gestion des interférences avec le dispositif ne nécessite pas davantage de ressources symboliques que la conduite sans assistance, que ce soit au début ou à la fin de la phase de pratique. Cette gestion des interférences se fait très rapidement au niveau subsymbolique dans les deux cas.

Ces données nous permettent de conclure que conduire avec le contrôle partagé produit la même adaptation, dans le sens routinisation, que celle nécessaire à la conduite avec le simulateur sans contrôle partagé. Dans les deux cas, c'est donc essentiellement par assimilation de la situation actuelle à une situation déjà connue et maîtrisée de conduite que les conducteurs se sont adaptés. Il ne semble pas y avoir eu de processus majeur

d'accommodation qui aurait produit une importante restructuration de l'activité de conduite. Cette restructuration aurait pu être observée, par exemple, par des interactions entre pratique prolongée et type de pratique. Un réglage différent du compromis cognitif aurait également pu être un marqueur pertinent. Enfin, nous nous serions attendus à un effet de type contentement lors des situations de contournement, s'il y avait eu un basculement du type de coopération vers quelque chose se rapprochant de la délégation de fonction. Dans le cadre de la coopération homme-machine, le contentement (pour « *complacency* »), correspond à une attitude de retrait de l'activité par rapport à la machine et s'observe souvent via des temps de réaction allongés lors des situations critiques (Parasuraman, Molloy & Singh, 1993). Les conducteurs ayant longuement conduit avec le contrôle partagé auraient pu être amenés à se désengager, au moins partiellement, de la tâche en se satisfaisant de ce que faisait la machine. Ce ne fut pas du tout le cas dans cette expérimentation.

Cette absence de restructuration importante de l'activité s'explique certainement par le fait que ce réglage du contrôle partagé s'intègre bien dans la tâche de guidage du véhicule et n'a donc pas produit de modifications majeures dans l'activité de conduite. Nous pensons donc que le contrôle partagé que nous avons étudié ici pourrait être davantage intégré par le conducteur comme une simple modification de la dynamique de la direction que comme l'intervention en continu d'un autre agent. Cela est d'autant plus intéressant que des gains dans la performance de conduite sont tout de même constatés avec ce contrôle partagé.

8.5.2 Contrôle partagé et homéostasie du risque

Les résultats obtenus sur la vitesse viennent compléter l'analyse. Les conducteurs ne conduisent pas plus vite avec le dispositif. Ils auraient même tendance à rouler légèrement moins vite, tout du moins durant le premier tour de la phase de pratique. Les conducteurs ne prennent donc pas plus de risque sur cette variable, malgré le gain de performance sur l'autre variable (écart latéral). Nous aurions pu nous attendre à une augmentation de la vitesse au fur et mesure de la pratique avec le dispositif. Les théories de la modélisation du risque postulent, en effet, un processus de régulation des risques (Wilde, 1982). La diminution des risques sur l'écart latéral aurait pu se traduire par une augmentation des risques sur la vitesse. Ce ne fut pas le cas.

A l'inverse nous aurions pu observer une vitesse inférieure sur toute la durée de la phase de pratique. La gestion des interférences avec le dispositif aurait pu nécessiter en effet un contrôle de l'activité plus important et donc une diminution de la vitesse afin de faciliter ce contrôle. Il est vrai que les conducteurs en situation de contrôle partagé ont conduit légèrement moins vite durant le premier tour de la phase de pratique, toutefois, la différence de vitesse n'est plus significative sur l'ensemble de la phase de pratique ce qui signifie que les conducteurs n'ont pas eu besoin d'adapter sensiblement leur vitesse afin de faciliter la gestion des interférences avec le contrôle partagé. Cela vient donc confirmer ce que nous développons précédemment sur la routinisation de l'activité et le fait que la régulation de l'activité s'opère de la même façon avec ou sans assistance, passé les premiers temps de prise en main.

La routinisation de l'activité semble montrer que la gestion des interférences avec le dispositif se fait au niveau subsymbolique. De ce fait, les conducteurs ne ressentent pas forcément, en continu, un gain véritable en sécurité et ne sont donc pas nécessairement enclins à augmenter leur vitesse, malgré la réduction de la variabilité de l'écart latéral produite par le dispositif. Pour conclure, ce gain ne serait pas traduit par les conducteurs comme un gain visible sur la sécurité.

Enfin, cela nous mène vers la discussion de la différence entre performance et sécurité à propos de la variabilité de l'écart latéral. Le dispositif diminue la variabilité de l'écart latéral, ce que nous interprétons comme une amélioration de la performance de conduite, en termes de sécurité. C'est en effet une conclusion généralement partagée par les chercheurs s'intéressant à la conduite automobile. Toutefois, bien que dans Deroo, Mars & Hoc (2012) les conducteurs aient déclaré que ce degré de contrôle partagé améliore la sécurité, il n'est pas certain que cette augmentation de la sécurité soit réellement ressentie en temps réel durant la conduite. Nous pointons donc ici la distinction qui existe nécessairement entre la vision globale de l'analyse et la vision située, éphémère et dynamique du conducteur tout au long du trajet réalisé.

8.5.3 Développement d'un modèle interne de la direction intégrant le contrôle partagé

La comparaison test-retest réalisée sur le contournement nous informe que seule l'association des conditions pratique sans assistance et contournement sans assistance permettent un gain de performance. Dans les autres cas il n'y a pas d'amélioration de la performance entre le test et le retest. Ainsi, seuls les conducteurs ayant longuement conduit sans assistance ont développé un certain degré de maîtrise de leur véhicule lors du contournement réalisé dans une condition identique, c'est-à-dire sans assistance. Toutefois, les conducteurs ayant pratiqué longuement avec le contrôle partagé ne se retrouvent pas véritablement dans la même condition que ceux ayant conduit sans assistance. Le dispositif est, en effet, désengagé quelques secondes avant l'obstacle pour la condition contournement avec contrôle partagé. Nous pensons donc que les conducteurs ont développé une habileté dans le contrôle du véhicule en fonction du type de conduite pratiquée (avec ou sans contrôle partagé), mais que le contournement ne permet pas aux conducteurs ayant pratiqué avec contrôle partagé de démontrer cette habileté. Néanmoins, si cette habileté ne peut être démontrée, nous soulignons tout de même l'absence de phénomène de type contentement, tel que nous l'avons déjà précisé (Parasuraman, Molloy & Singh, 1993), ce qui est un résultat important en soi.

Ensuite, la situation avec défaillance vient compléter ce tableau. La déviation de la trajectoire pour les conducteurs ayant pratiqué avec contrôle partagé correspond tout à fait à un phénomène de type *after-effect*. Cette présence d'un *after-effect* est un bon indicateur d'adaptation. Les conducteurs ayant intégré l'action du dispositif dans leurs boucles de contrôle sensori-motrices présentent une dégradation de leur performance lorsque le dispositif est subitement retiré. Au contraire, les conducteurs ayant pratiqué sans assistance ne présentent pas d'*after-effect* lors de la défaillance. Nous en déduisons donc qu'un modèle interne de la direction intégrant l'intervention continue du dispositif s'est rapidement mis en place pour les conducteurs ayant pratiqué le contrôle partagé. Ce modèle interne confirme également la routinisation de l'activité dans le sens où la gestion des interactions avec le dispositif est véritablement intégrée dans les boucles de contrôle sensori-moteur et ne se fait donc pas par un traitement symbolique profond.

Ce résultat n'était pas forcément attendu puisque l'intervention dynamique de l'assistance ne facilitait pas la mise en place d'un tel modèle interne. Ce modèle interne doit faciliter la gestion des interférences avec le dispositif. Les conducteurs doivent, en effet, gérer le couple délivré par l'assistance, mais également le fait que ce couple varie en continu. Nous en concluons donc que les conducteurs ont finalement développé un modèle interne intégrant l'intervention dynamique du dispositif leur permettant d'anticiper, au niveau subsymbolique, ce que la machine va faire en fonction de leurs propres actions. Ou bien, réciproquement d'anticiper ce qu'ils doivent faire en fonction de ce que la machine va faire. Le caractère dynamique de l'activité ne nous permet pas de trancher franchement entre ces deux

possibilités de régulation de l'activité. De plus, du fait de la routinisation de l'activité et de l'élaboration d'un modèle interne de la direction nous pensons que les deux sont étroitement entremêlés lors du contrôle partagé.

Nous avons précisé lors de la discussion sur la routinisation que l'adaptation s'était déroulée essentiellement par assimilation. L'élaboration d'un modèle interne démontre néanmoins qu'un minimum d'accommodation a été réalisée puisque les conducteurs ont mis à jour leur modèle interne de la direction en intégrant l'intervention du dispositif. L'adaptation selon Piaget résulte en effet d'un double processus. Nous avons montré que la routinisation de l'activité, sans restructuration majeure montrait la part plus importante du rôle joué par l'assimilation, toutefois, bien qu'une restructuration majeure n'ait pas eu lieu, la mise à jour d'un modèle interne de la direction démontre la présence d'un minimum d'accommodation également, mais uniquement au niveau des routines de contrôle de la direction. Enfin, au sens de Rabardel et Béguin (2005) nous décririons ce processus d'adaptation comme correspondant au développement de schème d'usage plutôt que d'instrumentation du dispositif.

8.5.4 Rôle de l'expertise de conduite et de la familiarisation avec le circuit

Ces résultats ne doivent pas nous faire oublier que la comparaison entre les deux types de conduite prolongée n'a été que partiellement réalisée dans cette étude. Nous avons recruté uniquement des conducteurs ayant leur permis de conduire, afin de prendre rapidement en main le simulateur. Toutefois, ces conducteurs ont appris à conduire et conduisent depuis plusieurs années sans assistance. Ces conducteurs ont donc déjà développé un certain degré de compétence qui leur permet d'assimiler la nouvelle situation de contrôle partagé en fonction de ces connaissances antérieures. Ainsi, nous ne pouvons pas affirmer qu'un conducteur apprenant à conduire avec le contrôle partagé, et/ou conduisant ensuite uniquement avec le contrôle partagé, produise le même type d'activité de conduite à plus long terme.

De la même façon, des contraintes méthodologiques ont nécessité de conserver le même circuit durant tous les tours de pratique. Cela était nécessaire afin de pouvoir comparer les données entre elles. Toutefois cela nous empêche de pouvoir distinguer le réel effet de la pratique prolongée du dispositif, d'un éventuel effet lié à la familiarisation avec le circuit. Ce que nous pouvons néanmoins affirmer est que tous les conducteurs ont assimilé simultanément les contraintes liées au simulateur (cabine) et les contraintes liées au circuit. Les différences constatées ont alors été associées au type de conduite pratiquée (avec ou sans assistance).

En termes de recherche nous voyons donc deux pistes qu'il serait intéressant d'explorer dans l'avenir. Tout d'abord, il serait judicieux d'étudier le cas d'usage dans lequel un conducteur apprendrait à conduire ou utiliserait très tôt et de façon continue le contrôle partagé. Il pourrait également être intéressant d'étudier les éventuels liens ou interactions pouvant exister entre effets de la pratique et familiarisation avec le circuit.

8.6 Conclusion

Dans cette recherche nous avons étudié les effets qu'une pratique prolongée en situation de contrôle partagé pouvait avoir en termes de mécanismes adaptatifs. Nous obtenons des résultats plutôt prometteurs en termes de coopération homme-machine avec le réglage peu intrusif que nous avons sélectionné. Le contrôle partagé s'intègre en effet très bien dans les boucles de contrôle sensori-moteur et semble presque considéré comme faisant partie de la dynamique de la direction.

Il serait alors intéressant d'effectuer le même type d'étude avec un degré plus important de

contrôle partagé (SC21 ou SC31 dans la terminologie de Deroo, Mars & Hoc (2012). Plutôt que de seulement mettre à jour leur modèle interne de la direction, il est possible que les conducteurs doivent alors changer de stratégie de coopération. Par exemple nous pourrions assister progressivement à une coopération de type délégation de fonction (changement de mode de coopération homme-machine). Nous observerions alors une adaptation de type accommodation plutôt qu'une simple assimilation de la nouvelle situation de conduite.

La défaillance, quant à elle, illustre la problématique de l'absence d'informations prévisionnelles sur l'action du dispositif. Ce n'est que lorsqu'il est trop tard que les conducteurs détectent un dysfonctionnement. Du point de vue des recommandations ergonomiques nous pensons qu'une voie à explorer est celle de l'élaboration d'un référentiel commun entre l'homme et la machine.

Remerciements

Ce projet de recherche a été financé par l'ANR (Agence National pour la recherche), programme VTT, projet PARTAGE (n° 0866C0222).

8.7 Références

- Abbink, D., A., Mulder, M., & Boer, E., R. (2011). Haptic shared control: smoothly shifting control authority. *Cognition, Technology & Work*, 14, 19-28.
- Amalberti R. (1996). *La Conduite des systèmes à risque*, Coll. Le Travail Humain, Paris, Presses Universitaires de France.
- Ben-Yaacov, A., Maltz, M., & Shinar, D. (2002). Effects of an in- vehicle collision avoidance warning system on short and long-term driving performance. *Human Factors*, 44, 335–342.
- de Winter, J.C.F., & Dodou, D. (2011). Preparing drivers for dangerous situations: A critical reflection on continuous shared control. In: *IEEE proceedings of the IEEE SMC conference*, Anchorage, Alaska, USA.
- Deborne, R., (2009). Modélisation de l'adaptation des conducteurs au comportement du véhicule et expérimentations sur simulateur. *Thèse de doctorat*. Ecole centrale de Paris.
- Deroo, M., Mars, F., & Hoc, J.M. (2012). Analysis of the human-machine cooperation during driving with different degrees of shared control. *Manuscript submitted for publication*.
- Emken, J.L., Benitez, R., Sideris, A., Bobrow, J.E., & Reinkensmeyer D.J. (2007). Motor adaptation as a greedy optimization of error and effort. *Journal of Neurophysiology*. 97, 3997-4006.
- Feygin, D., Keehner, M., & Tendick, R. (2002). Haptic guidance: experimental evaluation of a haptic training method for a perceptual motor skill. *Proceedings 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and teleoperator systems. HAPTICS 2002*, Orland, FL, USA.
- Forsyth, B., & MacLean, K.E. (2006). Predictive haptic guidance: intelligent user assistance for the control of dynamic tasks. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 12, 103–113.
- Gray, R., & Regan, D. (2000). Risky driving behavior: a consequence of motion adaptation for visually guided motor action. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26, 1721-1732.

- Griffiths, P.G., & Gillespie, R.B. (2005) Sharing control between humans and automation using haptic interface: primary and secondary task performance benefits. *Human Factors* 47, 574–590.
- Held, R. (1965). Plasticity in sensory-motor systems. *Scientific American*, 213, 84–94.
- Hoc, J.M., Mars, F., Milleville-pennel, I., Jolly, E., Netto, M., & Blosseville, J.M. (2006). Evaluation of human-machine cooperation modes in car driving for safe lateral control in curves: delegation and mutual control modes. *Le Travail Humain*, 69, 155–185.
- Hoc, J.M., Young, M.S., & Blosseville, J.M. (2009). Cooperation between drivers and automation : implications for safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10, 135-160.
- Lechner D., Delanne Y., Schaefer G., & Schmitt V., (1997). *Méthodologie de validation du logiciel de dynamique automobile CALLAS*. SIA 970202. Congrès SIA Lyon, Avril 1997. Reprinted in *Ingénieurs de l'automobile* N°713, May 1997.
- Lecoutre, B. & Poitevineau, J. (2005). Le logiciel “LePAC”. *La Revue de Modulad*, 33 (whole volume). Available from: <http://www.univ-rouen.fr/LMRS/Persopage/Lecoutre/PubBL.html> [Accessed 3 January 2012] (English version)
- Lewis-Evans, B., & Charlton, S. G. (2006). Explicit and implicit processes in behavioural adaptation to road width. *Accident Analysis & Prevention*, 38, 610-617.
- Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models. What do we know, what should we do? In L. Evans & R. Schwing (Eds.), *Human behavior and traffic safety* (pp. 485-525). Plenum press, New York.
- OCDE (1990). *Adaptations du comportement aux changements dans le système de transports routiers*. Paris: Organisation de coopération et de développement économiques.
- Parasuraman, R., Molloy, R., & Singh, I.L., (1993). Performance consequences of automation-induced 'complacency'. *International Journal of Aviation Psychology*, 3, 1–23.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 30, 286-297.
- Philip, P. et al. (2003). Effect of fatigue on performance measured by a driving simulator in automobile drivers. *Journal of Psychosomatic Research*, 55, 197-200.
- Piaget, J. (1974). *Adaptation vitale et psychologie de l'intelligence*. Paris: Hermann.
- Rabardel, P., & Béguin, P. (2005). Instrument mediated activity: from subject development to anthropocentric design. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 6, 429-461.
- Rouanet, H. (1996). Bayesian methods for assessing importance of effects. *Psychological Bulletin*, 119, 149–158.
- Rouanet, H. & Lecoutre, B. (1983). Specific inference in ANOVA: from significance tests to Bayesian procedures. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 36, 252–268.
- Saad., F. (2006). Some critical issues when studying behavioural adaptations to new driver support systems. *Cognition, Technology & Work*, 8, 175–181.

- Saleh, L., Chevrel, P., & Lafay, J.F. (2010). Generalized H2-preview control and its application to car lateral steering. In *Proceedings IFAC Time Delay Systems 2010* (pp. LS 796), Praha, Czech Republic, (2010-06-07).
- Salvucci, D.D. (2001). Predicting the effects of in-car interface use on driver performance: An integrated model approach. *International Journal of Human- Computer Studies*, 55, 85-107.
- Shadmehr, R., & Brashers-Krug, T. (1997). Functional stages in the formation of human long-term motor memory, *The Journal of Neuroscience*, 17, 409–419.
- Sheridan, T. B. (1992). *Telerobotics, automation, and human supervisory control*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Vergnaud, G. (1990). Développement et fonctionnement cognitifs dans le champ conceptuel des structures additives. *Développement et fonctionnement cognitifs chez l'enfant, des modèles généraux aux modèles locaux*, (sous la direction de Netchine-Grynberg G.), Paris, Presses Universitaires de France.
- Wilde, G. (1982). Critical issues in risk homeostasis theory, *Risk Analysis*, 2, 249-258.
- Young, M.S., Stanton, N.A. and Harris, D. (2007). Driving automation: learning from aviation about design philosophies, *International Journal of Vehicle Design*, 45, 323–338.

Chapitre 9 - Discussion générale

« Lorsque vous avez éliminé l'impossible, ce qui reste, si improbable soit-il, est nécessairement la vérité. ».

Le signe des quatre, 1890, **Arthur Conan Doyle**

SOMMAIRE

- 9.1 Synthèse des principaux résultats
 - 9.2 Discussion sur les limitations méthodologiques
 - 9.3 Références
-

9.1 Synthèse des principaux résultats

Dans le cadre de cette discussion générale, nous allons commencer par rappeler les questions de recherche ainsi que les réponses et conclusions que nous avons apportées dans chacun des chapitres expérimentaux. Puis, nous présenterons les principales limitations que nous voyons à notre travail, du fait des choix méthodologiques que nous avons faits en début de thèse.

D'un point de vu général, notre objectif consistait à s'intéresser aux processus psychologiques mis en œuvre dans le contrôle de l'activité de guidage du véhicule lorsqu'agit un automate par le biais de la modalité haptique. Nous nous étions posé la question de savoir comment s'opère le contrôle de l'activité de guidage du véhicule lorsqu'un automate agit directement sur le dispositif de commande et intervient au niveau subsymbolique par le biais de la modalité haptique.

9.1.1 L'intervention ponctuelle : le mode amorçage moteur

Un premier axe de recherche consistait à étudier spécifiquement le cas de l'intervention ponctuelle afin d'évaluer la capacité des conducteurs à conserver la totale maîtrise du véhicule quels que soient les effets du dispositif. Le mode amorçage a été sélectionné dans

nos recherches car il reposait sur l'idée de pouvoir présenter un signal ponctuel agissant notamment au niveau subsymbolique du contrôle cognitif, via la modalité haptique.

Le chapitre 5 a permis de répondre à la question de savoir si le conducteur pouvait inhiber l'effet ponctuel d'un tel dispositif, en fonction du sens de l'amorçage par rapport à la sortie de voie (ipsilatéral ou contralatéral), ainsi que de sa force. Les conducteurs ont été capables de prendre en compte des éléments du contexte pour initier leur manœuvre de correction. Par exemple, il n'y a pas eu de mouvement en deux étapes, dans laquelle une première réaction irrépressible vers la sortie de voie serait suivie d'une correction vers le centre de la voie. Les temps de réaction les plus petits ont été observés lorsque l'amorçage moteur était orienté vers la sortie de voie (amorçage contralatéral). Cela suggère que, lorsque les occlusions visuelles prenaient fin, les conducteurs détectaient immédiatement une discordance visuo-haptique entre le flux visuel (renseignant sur la sortie de voie) et la direction du signal haptique (suggérant d'accentuer la sortie de voie). La détection de la discordance et le déclenchement de la réponse qu'elle appelait s'exerçaient sans doute au niveau subsymbolique, ce que semblent confirmer les entretiens post expérimentaux étant donné l'absence de conscience de signaux erronés. Enfin, si les temps de réaction ont été les plus rapides avec l'amorçage moteur erroné, les durées de sortie de voie ont été plus réduites lorsque le signal était correct. L'efficacité de la réponse globale ne semblait donc pas dépendre uniquement de son délai d'initiation.

Le chapitre 6 a précisé ensuite de quelle façon les conducteurs avaient la capacité de moduler le geste de correction en fonction de la représentation du risque. L'amorçage moteur a permis de réduire les temps de réaction, par contre, la consigne de risque n'a pas eu d'effet sur cette variable. D'une part, cela semble confirmer l'action au niveau subsymbolique du dispositif d'amorçage moteur. D'autre part, ce n'est que lors du réglage du mouvement de correction que le traitement symbolique a pu s'exercer et que des différences, entre consignes, ont été constatées dans le pic d'accélération du volant. Ces pics ayant été enregistrés 450 ms après l'initiation du mouvement, c'est donc très rapidement que la supervision a pu agir sur ce réglage, mais pas dès l'initialisation du mouvement. Enfin, la différence constatée entre virage et ligne droite sur les angles maximum du volant nous a conduit à conclure que le traitement du risque induit par la différence de géométrie était également intervenu pour moduler l'exécution de la réponse motrice.

Ainsi, pour conclure sur l'amorçage moteur, lorsque l'intervention est ponctuelle, le processus de supervision entre très tôt en jeu dans le contrôle de l'activité. L'intervention des boucles sensori-motrices ne produit pas de réponses motrices invariantes, ce qui signifie que l'intégration des informations haptiques et du contexte est très rapide. De plus, nous avons montré que le geste de correction pouvait également être modulé très rapidement, dès les 450 ms suivant l'initiation de ce geste.

9.1.2 L'intervention continue: le mode de contrôle partagé

Un second axe de recherche consistait à étudier le cas de l'intervention continue afin de comprendre la façon dont le conducteur l'intègre dans ses boucles de contrôle sensori-moteur. Le mode contrôle partagé a été sélectionné dans nos recherches car il permettait de délivrer un signal haptique en continu sur le volant, tout en corrigeant en continu la trajectoire.

Le chapitre 7 a permis de distinguer différents réglages du dispositif (en termes de degré de partage du contrôle entre l'homme et la machine) ainsi que le rôle que joue la capacité du conducteur à anticiper la trajectoire dans le partage effectif du contrôle. Nous avons observé que même avec les degrés de partage les plus élevés en faveur de la machine, il n'y avait pas de basculement d'un mode de coopération de type contrôle partagé vers un mode de

coopération de type délégation de fonction. Une discussion à propos de la répartition de l'autorité a alors été proposée afin d'expliquer pourquoi les conducteurs ont eu tendance à davantage redresser leurs virages avec les degrés les plus élevés, alors que ces réglages étaient conçus pour les ramener davantage au centre de la voie et donc les faire moins redresser les virages. D'une certaine façon, les conducteurs ont anticipé les interférences avec la machine en la contraindant de telle sorte qu'ils s'assuraient de conserver la pleine autorité dans le système homme-machine. Nous avons ensuite montré qu'avec les réglages intermédiaires (SC11 et SC21) l'effort physique requis pour maintenir le véhicule dans la voie était réduit, tout en augmentant la performance du système homme-machine (réduction de la variabilité de l'écart latéral) et en laissant les conducteurs libres de leur choix de trajectoire (pas d'effet sur la tendance à redresser les virages). Nous avons également montré que plus le partage était en faveur de la machine et plus le conducteur pouvait se reposer sur elle lorsque sa capacité à anticiper la trajectoire diminuait (brouillard). Pour conclure, une légère diminution de l'exigence visuelle a été constatée dès lors que l'intervention de la machine sur la trajectoire était notable, c'est-à-dire avec tous les réglages du contrôle partagé, à l'exception de SC01.

Le chapitre 8 a conclu la partie expérimentale de cette thèse en étudiant la façon dont un réglage du contrôle partagé (SC11) pouvait s'intégrer à moyen terme dans les boucles de contrôle sensori-motrices des conducteurs et quels pouvaient être ses effets en termes de mécanismes adaptatifs. Tout d'abord le rapide désengagement du contrôle symbolique de la tâche de conduite chez tous les conducteurs (conduisant longuement avec ou sans contrôle partagé) nous indique que la gestion des interférences avec le dispositif s'effectue essentiellement au niveau subsymbolique. Il n'est pas nécessaire, pour les conducteurs conduisant en situation de contrôle partagé, de réaliser un contrôle plus symbolique afin de gérer les interférences avec la machine. Pour ce qui est des effets sur la trajectoire (variabilité de l'écart latéral et vitesse), entre les facteurs *pratique* (temps de conduite) et *type de pratique* (avec ou sans contrôle partagé), un modèle additif a été retenu. L'ensemble de ces données nous a conduit à conclure que conduire avec le contrôle partagé produit la même adaptation, dans le sens de la routinisation de l'activité, que celle nécessaire à la conduite avec le simulateur sans contrôle partagé. De plus, nous n'avons pas observé de phénomènes d'homéostasie du risque (sur la vitesse) ou de contentement (lors des contournements), ce qui laisse présager que le contrôle partagé s'intègre très bien dans les boucles de contrôle sensori-moteur, sans provoquer les effets néfastes parfois associés à l'automatisation. Enfin, la présence d'un *after-effect*, lors d'une situation de défaillance du dispositif chez les conducteurs ayant longuement conduit en situation de contrôle partagé, nous indique la mise à jour assez rapide d'un modèle interne de la direction intégrant l'intervention du dispositif.

Ainsi pour conclure sur le contrôle partagé, lorsque l'intervention est continue et limitée, la gestion des interférences entre l'homme et la machine s'effectue essentiellement au niveau subsymbolique. Le système homme-machine est plus efficace, tout en gardant la capacité de s'adapter à différentes situations.

9.1.3 Les recommandations ergonomiques issues de ce travail

Historiquement, le cadre de la coopération homme-machine s'est développé autour d'activités principalement symboliques tel que le pilotage d'avion de ligne (Hoc, 2000). L'ensemble des travaux expérimentaux menés au travers de l'accomplissement de ce travail doctoral présente l'originalité de se situer à l'articulation des niveaux de traitement de l'information, symboliques et subsymboliques.

Au delà des questions d'ordres psychologiques auxquelles nous venons de répondre, une autre catégorie de questions avait pour objectif de s'intéresser aux recommandations ergonomiques

à extraire de ces différentes analyses. De la même façon que précédemment, ces conclusions dépendent du fait que l'intervention est ponctuelle ou continue.

Avec le mode amorçage moteur, le conducteur est globalement plus efficace pour effectuer des manœuvres de correction de sortie de voie. Nous avons également montré que l'ensemble de la correction ne dépendait pas que de l'initiation de la correction. Nous en concluons donc que chercher à réduire à tout prix les temps de réaction n'est pas suffisant pour réduire la fréquence et les conséquences des sorties de voie involontaires. Il est donc nécessaire de travailler sur toute la réponse de correction afin de concevoir un système homme-machine plus efficace. Par exemple, les conducteurs prenant en compte des éléments du contexte (représentation du risque, géométrie de la route) pour moduler leur manœuvre de correction, nous pensons que la force de l'assistance devrait être adaptée en fonction de la situation rencontrée. Un risque élevé en virage pourrait nécessiter un réglage plus puissant alors qu'un risque plus mineur en ligne droite nécessite sans doute un amorçage plus léger.

Avec le contrôle partagé continu, le système homme-machine est globalement plus efficace lorsque l'intervention sur la trajectoire par le dispositif est limitée. Avec la loi de commande que nous avons utilisée (Saleh et al., 2010), un partage optimal du contrôle entre l'homme et la machine se situe entre SC11 et SC21. Avec des réglages plus puissants, l'automate interfère négativement avec le conducteur pour ce contrôle, ce qui conduit à une détérioration de la performance du système homme-machine et provoque un coût très important pour le conducteur. Notons néanmoins qu'il est vrai que la consigne était la même, quel que soit le réglage utilisé. La consigne, du partage du contrôle du volant, pourrait ainsi avoir conduit les conducteurs à souhaiter partager le contrôle, même avec les réglages les plus puissants qui finalement se seraient très bien contentés d'un désengagement des conducteurs de la tâche de guidage du véhicule. Enfin, une intervention limitée permet de produire une assistance transparente pour le conducteur qui s'intègre très bien dans les boucles de contrôle sensori-motrices.

9.2 Discussion sur les limitations méthodologiques

Plusieurs choix méthodologiques ont été réalisés en début de thèse. Ces choix ne sont pas sans conséquence, et de ce fait, certaines limitations méthodologiques peuvent être relevées à propos de ce travail. Nous souhaiterions revenir sur quelques choix méthodologiques qui nous semblent important de discuter à l'issue de nos travaux de recherche et notamment ceux ayant trait à la validité écologique de nos recherches.

Tout d'abord, un premier aspect que nous voudrions discuter est celui **du choix de travailler sur simulateur de conduite**. Nous confirmons ce que nous avons avancé dans le chapitre 4, à savoir qu'il nous aurait été impossible d'effectuer nos travaux dans un contexte de route réelle, du fait notamment des situations à risque que nous avons provoquées. La piste d'essai n'aurait pas non plus été une solution et n'aurait certainement pas été plus écologique. Si des sensations proprioceptives auraient pu être présentes, les situations expérimentales auraient toutefois été plus difficilement contrôlables. Par exemple, les sorties de voie auraient été moins facilement reproductibles à l'identique d'un conducteur à l'autre et un bruit expérimental important se serait ajouté à la variabilité interindividuelle. La gestion du trafic aurait également été plus problématique et très coûteuse à mettre en œuvre sur piste. Enfin, il est vrai que le simulateur à base fixe de l'IRCCyN ne reproduisait pas de sensations proprioceptives, mais nous ne pensons pas que la présence de ces informations aurait modifiée les résultats que nous avons obtenus. Ces sensations sont très importantes dans le réglage de la vitesse d'approche en virage, mais notre objet d'étude (les coordinations visuo-motrices en situation de coopération homme-machine) était tout autre et n'était donc pas dénaturé par ce manque d'information. Aussi, pour conclure, l'utilisation du simulateur nous

a permis de contrôler très efficacement la variabilité situationnelle afin de pouvoir nous concentrer sur la variabilité individuelle provoquée par les différents facteurs manipulés tout au long de cette thèse.

Dans les deux premiers chapitres expérimentaux, nous avons utilisé **la méthode des occlusions visuelles**. Cette méthode a été choisie car elle autorise une très bonne reproductibilité des situations critiques. Nous avons besoin de cette reproductibilité afin de pouvoir étudier précisément l'articulation entre traitement symbolique et subsymbolique. Cette situation expérimentale se distingue toutefois de la situation de sortie de voie en conduite naturelle. Une occlusion visuelle ne correspond pas véritablement à une situation de distraction. L'attention n'est pas redirigée vers autre chose, tel que cela peut être le cas lors d'une distraction. Au contraire, les conducteurs se préparaient, durant les quelques secondes de l'occlusion, à réagir le plus rapidement possible dès lors que la scène visuelle serait de nouveau présente. Nos résultats génériques mériteraient donc d'être reproduits dans des situations plus écologiques afin de s'assurer, par exemple, que les processus que nous avons identifiés sont également mis en œuvre sous l'effet de la surprise et de la nécessité de réorientation de l'attention.

Ensuite, il pourrait nous être reproché le fait que nous n'ayons étudié que des situations assimilées à un détournement de l'attention. De ce fait, nous ne savons pas comment réagiraient **les conducteurs dans d'autres situations d'usage** (sommolence, alcool). Il s'avère que ce type de dispositif ne peut effectivement pas être une solution pour ces situations. D'éventuelles interactions entre les effets des dispositifs que nous avons étudiés et ces situations pourraient être analysées, mais il nous semble important de nous positionner à ce niveau. Nous pensons que d'autres solutions doivent être prévues. En effet, l'installation d'assistances à la conduite signifie, *in fine*, qu'un choix est fait sur le fait que le conducteur fasse partie intégrante du système homme-machine. Si ce conducteur est en condition dégradée, il est naturel de penser que le système homme-machine sera également dégradé. Le rôle des assistances ne sera pas de remplacer ces conducteurs, car ce type d'assistance serait inefficace. Aussi, même si une assistance à la conduite est capable de transitoirement rehausser le niveau d'éveil du conducteur, la seule véritable solution dès lors que le conducteur n'est pas jugé apte à conduire est celle d'un arrêt complet du véhicule.

Enfin, dans nos travaux, **les échantillons de conducteurs** que nous avons sélectionnés sont plutôt jeunes et à majorité masculine. Si nous pensons que l'amorçage moteur aura les mêmes effets quel que soit le genre; le facteur d'âge mériterait d'être étudié spécifiquement. Par exemple il pourrait être pertinent de s'intéresser à la façon dont les capacités de supervision symbolique de l'activité pourraient être amenées à décliner avec l'âge et donc à interagir avec les effets des dispositifs utilisés dans nos recherches. De la même façon, si nous avons exploré les effets à moyen terme d'une conduite en situation de contrôle partagé, nous n'avons pas pris en compte les styles de conduite. Il serait alors intéressant d'étudier la façon dont ces styles de conduite interagissent avec les effets du contrôle partagé, du fait de son intervention en continu. En conclusion, nos résultats sont donc valides pour les échantillons que nous avons sélectionnés, mais il pourrait être pertinent, dans de futures recherches d'étendre cette base de conducteurs en intégrant d'autres variables dans l'analyse, telles que l'âge, le genre ou le style de conduite.

9.3 Références

Hoc, J.M. (2000). From human-machine interaction to human-machine cooperation. *Ergonomics*, 43, 833-843.

Saleh, L., Chevrel, P., & Lafay, J.F. (2010). Generalized H₂-preview control and its application to car lateral steering. In *Proceedings IFAC Time Delay Systems 2010* (pp. LS 796), Praha, Czech Republic, (2010-06-07).

Chapitre 10 - Conclusion générale et perspectives

« Quelque chose qui paraît d'abord hors de propos, voire absurde, peut devenir un indice décisif. ».

2010 : Odyssée deux, 1982, **Arthur C. Clarke**

SOMMAIRE

- 10.1 Conclusion générale
 - 10.2 Perspectives
 - 10.3 Références
-

10.1 Conclusion générale

Ce projet de thèse s'est inscrit dans le cadre d'un projet ANR, le projet PARTAGE. Ce projet a mobilisé la participation de sept partenaires, dont cinq laboratoires et deux industriels. Ces partenaires se sont réunis avec pour objectif de comprendre comment pouvait s'effectuer le contrôle de la trajectoire d'un véhicule et comment des automates pouvaient intervenir dans ce contrôle. Différents aspects de l'activité de conduite, des analyses de trajectoire sur route réelle ou des recherches sur la façon de concevoir les automates ont donc nourri notre réflexion, en plus de nos propres activités de recherche réalisées dans le cadre de cette thèse. De ce fait, nous allons, au moins en partie, réintroduire ces réflexions dans cette conclusion générale, afin de prendre un peu de recul sur les analyses et les résultats que nous venons de présenter. Nous allons traiter de la question de la temporalité d'intervention au niveau haptique. Nous discuterons ensuite la question de la multiplication des assistances pour terminer sur la problématique du choix entre assistance et automatisation de la conduite. Enfin, nous concluons ce dernier chapitre en présentant les perspectives que nous envisageons dans la poursuite de ce travail de recherche.

10.1.1 La temporalité d'intervention au niveau haptique

Cette thèse a pour originalité d'introduire une réflexion sur l'effet que la temporalité d'intervention au niveau haptique va produire sur les processus de contrôle de l'activité. Nous avons étudié la question de l'amorçage haptique (intervention ponctuelle) ainsi que celle du guidage haptique (intervention continue). Il est vrai que le guidage haptique (contrôle partagé) ne s'est pas fait sans effet direct du dispositif sur la trajectoire, mais cette différence dans la temporalité d'intervention peut être discutée de façon transversale à l'étude de chaque dispositif pris séparément. Tout d'abord, nous voudrions rappeler le fait que ces assistances ne sont pas conçues pour les mêmes situations d'usage. Avec le mode amorçage moteur, nous nous situons plutôt dans l'imminence d'une sortie de voie alors qu'avec le contrôle partagé nous sommes davantage dans une situation de conduite nominale.

Agir au niveau subsymbolique conduit à une particularité. Si l'action est discontinue, elle nécessite une remontée vers un traitement symbolique du fait du traitement de cette discontinuité. C'est à la fois le but, l'avertissement, mais également l'inconvénient. L'idée d'intervenir au niveau subsymbolique avec le mode amorçage ne signifie nullement que le traitement du signal reste uniquement au niveau subsymbolique. Via la supervision, le conducteur modifie très rapidement le réglage de son compromis cognitif afin de pouvoir traiter l'interférence du dispositif dans son activité de guidage du véhicule.

L'intervention subsymbolique est cohérente puisqu'elle s'intègre dans le niveau de contrôle de l'activité de guidage du véhicule. Toutefois le caractère discontinu implique une réorientation de l'attention qui peut être profitable dans des occasions de quasi-sortie de voie mais très problématique et dérangeante si la situation n'est pas jugée risquée par le conducteur. L'intervention ponctuelle se heurte donc à un double verrou scientifique et technologique, celui du **seuil de déclenchement du dispositif lorsque son intervention est occasionnelle**.

Tout d'abord, comme le précise la description du mode de coopération homme-machine dans lequel s'inscrit l'amorçage moteur, le contrôle mutuel signifie, de fait, que l'assistance intervient pour critiquer l'action du conducteur. Il n'est pas très compliqué d'imaginer que les conducteurs vont alors avoir tendance à éviter cette critique de leur trajectoire en se conformant aux limites proposées par l'assistance. Il est donc nécessaire de déclencher l'assistance uniquement lorsque le conducteur en a réellement besoin. Ce premier point est très difficile à identifier car les conducteurs ont tendance à redresser les virages, voire à les couper, sans qu'ils se mettent réellement en danger. Le verrou scientifique vient donc du fait qu'il faut identifier précisément les seuils de déclenchement, une analyse purement géométrique ne pouvant suffire pour fixer ces seuils. Le verrou technologique vient alors du fait qu'une fois que des limites acceptables sont identifiées, il faut pouvoir concevoir des automates capables de détecter ces limites en fonction de différents contextes. Pour le moment il n'y a pas, à notre connaissance, d'automates capables de réaliser une analyse pertinente de la situation dans son ensemble. Néanmoins, des travaux consistant à intégrer une modélisation cybernétique des processus visuo-moteurs mis en jeu par les conducteurs dans un dispositif de contrôle partagé continu sont en cours (Mars et al. 2011) et pourrait mener vers une trajectoire optimale pour la machine plus proche d'une trajectoire, et donc d'une référence pour le seuil de déclenchement, qui soient acceptable pour le conducteur.

Bien que plus complexe, ce type de trajectoire reste néanmoins basé sur les caractéristiques géométriques de la route. Dans le projet PARTAGE, d'autres recherches ont développé une approche d'analyse et de modélisation de l'activité à partir de l'observation de situations réelles de conduite (Bellet, Paris, Deleurence, Bonnard & Moreau, 2012). Il ressort de cette analyse que de nombreux franchissements de voie, et parfois même de sortie, ne

correspondent pas à des erreurs mais plutôt à une réponse adaptée en fonction du contexte. Par exemple, il arrive que le conducteur ait à dépasser un vélo ou à s'écarter légèrement du centre de sa voie pour ne pas passer trop près d'un camion ou d'une moto venant en sens inverse. Ce type d'analyse s'intègre donc dans une démarche d'identification de trajectoires acceptables en fonction du contexte de la situation. Ainsi, au delà d'une analyse géométrique des trajectoires, fussent-elles très complexes, les automates devront donc être capables de prendre en compte des caractéristiques situationnelles afin de correspondre réellement aux besoins des conducteurs et pouvoir s'intégrer parfaitement dans leur activité de conduite.

Ensuite, au delà du seuil de déclenchement, il est nécessaire d'adapter la force de l'assistance en fonction du contexte. Dans nos recherches nous avons distingué les sorties en virage et en ligne droite, relevant le fait qu'un léger amorçage était certainement suffisant en ligne droite, mais qu'un amorçage plus puissant pouvait être préférable en virage. Mais au delà de la géométrie, la vitesse doit également entrer en ligne de compte. Dans nos recherches, les sorties de voie étaient provoquées à 70 km/h, ce qui permettait de conserver la maîtrise du véhicule malgré l'amorçage haptique. A des vitesses plus élevées, la contrôlabilité des manœuvres n'a pas été étudiée et il est possible qu'un amorçage très faible soit suffisant et surtout recommandé afin de ne pas provoquer des pertes de contrôle dues à des réactions trop violentes pour la dynamique du véhicule.

Pour terminer sur la question de la temporalité, nous avons vu que le contrôle partagé pouvait s'intégrer dans les boucles sensori-motrices et que les conducteurs mettaient à jour un modèle de la direction intégrant ce contrôle partagé. Cette intégration est possible du fait de la continuité de l'intervention. Lorsqu'elle est ponctuelle, il ne peut y avoir de mise à jour du modèle, et la réponse suivant le déclenchement du mode amorçage moteur, bien que contrôlée très précocement, reste une réponse d'urgence.

De la même façon, la question de la temporalité d'intervention peut se poser au sein même du contrôle partagé. Dans certains de nos scénarios nous avons confronté les conducteurs à des désengagements prévus (contournements) ou non prévus (défaillances) de l'assistance. Dans certaines conditions, la trajectoire doit être réglée très finement et la question de l'engagement/ désengagement du contrôle partagé se pose alors. Nous avons en effet observé que lorsque les conducteurs étaient habitués à conduire avec le contrôle partagé, ils avaient un contrôle de la direction moins fin lorsqu'ils devaient revenir subitement à une situation de conduite sans contrôle partagé. Cela nous amène à nous interroger sur la question de la possibilité de désengager le contrôle partagé. Dans l'hypothèse où le réglage introduit dans une voiture serait très léger, c'est-à-dire inférieur ou égal au réglage que nous avons étudié dans le chapitre 8 (étude des effets à moyen termes du contrôle partagé), il nous semble préférable de recommander de rester sur un mode permanent. La mise à jour d'un modèle interne de la direction intégrant l'intervention du contrôle partagé n'est, en effet, pas anodine. Cette conclusion, qui résulte de l'identification d'un *after-effect* lors d'une situation de défaillance signifie que l'alternance entre engagement et désengagement de ce mode pourrait provoquer des difficultés d'adaptation au contrôle de la direction. Ainsi, de la même façon qu'avec une direction assistée, le conducteur n'aurait pas à gérer différents niveaux de conduite (partagé ou non). Pour le conducteur, il s'agirait d'une direction particulière qu'il finirait par intégrer complètement dans le contrôle moteur de la direction.

10.1.2 La multiplication des assistances à la conduite

Un autre critère est à prendre en compte dans le choix d'intégrer une assistance à la conduite dans un véhicule. Ce critère est celui du type d'assistance. Il est en effet désormais possible d'imaginer introduire des dispositifs techniques dans tous les aspects de la tâche de conduite. Certains projets s'intéressent aux changements de voies, d'autres à la détection des angles

morts ou à l'aide au diagnostic lors du franchissement d'intersections. Nous avons, de notre côté, étudié le cas spécifique des sorties de voie involontaires, mais il existe également des recherches sur la façon de limiter la vitesse d'approche en virage. Toutes ces technologies sont généralement étudiées au cas par cas, mais peu d'études, à notre connaissance, visent les possibles interactions liées à une utilisation simultanée de tous ces dispositifs.

Par exemple, il nous semble très important **d'éviter l'écueil de faire progressivement dériver l'activité de conduite vers une activité hautement symbolique de supervision**, qui serait très coûteuse en ressources et pourrait rapidement montrer ses limites. La multiplication des technologies de l'information dans les véhicules doit donc se faire avec parcimonie. La voie que nous avons développée dans cette thèse, d'intervention dans des processus de bas niveau n'est pas une voie très explorée pour l'interaction avec la technologie ; toutefois, nous pensons que cette voie a le mérite de ne pas transformer l'habitacle du véhicule en poste de pilotage d'avion de ligne.



Figure. 40. Illustration du tableau de bord de la nouvelle Ford Focus, qui intègre les dernières assistances à la conduite disponibles à la vente, telles que la détection des angles morts, des panneaux, ou l'avertissement aux sorties de voie involontaires.

Enfin, la recherche et par extension la société, devra trancher entre deux logiques radicalement différentes, que sont l'assistance à la conduite d'une part et l'automatisation de la conduite, d'autre part. Ce choix doit être fait consciemment, en intégrant les enjeux dans la prise de décision. Dans l'assistance à la conduite, le conducteur est dans la boucle et participe, de ce fait, au contrôle de la trajectoire. A l'inverse, dans l'automatisation de la conduite, le conducteur n'est plus dans la boucle de contrôle et change d'activité. Il devient notamment superviseur du système homme-machine et l'activité de conduite devient principalement une activité symbolique. Il ne va pas sans dire que ce basculement pose alors d'importantes questions en termes de formation ou de droit par exemple.

10.1.3 Le choix de l'assistance à la conduite ou de l'automatisation de la conduite

Le contrôle partagé, lorsqu'il atteint un réglage partageant équitablement la tâche de guidage (SC21 dans la terminologie du chapitre 7), semble se situer approximativement au centre du continuum allant de l'automatisation de la conduite à l'automatisation du véhicule. C'est d'ailleurs cette ambiguïté quand au type d'automatisation résultant du contrôle partagé qui alimente des discussions récentes en termes de partage de l'autorité (Abbink, Mulder & Boer, 2011). Selon Young, Stanton et Harris (2007), la répartition de l'autorité est en effet censée être le facteur dissociant l'automatisation de la conduite (autorité au conducteur) de

l'automatisation du véhicule (autorité à la machine). Toutefois, cette question de l'autorité revêt un caractère particulier dès lors que la machine intervient continuellement dans l'activité.

Avec l'amorçage moteur, nous nous situons clairement dans l'automatisation de la conduite. L'automate agit sur la tâche de conduite en venant initier le geste de correction et alerter le conducteur sur le fait qu'il encourt un risque de sortie de voie. Avec le contrôle partagé, la frontière entre automatisation de la conduite et automatisation du véhicule est beaucoup moins évidente. Dans le cas du contrôle partagé qui a été étudié dans le chapitre 8, l'assistance apparaît comme faisant partie de la dynamique du véhicule.

D'une certaine façon, **le contrôle partagé est un premier pas en direction de l'automatisation du véhicule**. Nous pensons qu'actuellement l'environnement routier est trop complexe pour une automatisation complète, mais que un premier pas dans cette direction consiste à concevoir des assistances qui interviennent directement dans la production de la trajectoire tout en laissant l'autorité au conducteur. Par exemple, bien que très intéressants pour étudier la gestion des interférences lors de la coopération au niveau haptique, les degrés de partage les plus puissants, que nous avons étudiés dans le chapitre 7, n'ont pas pour vocation à être installés sur véhicule réel.

Enfin, nous voudrions rappeler le paradoxe de la tendance existante qui consiste à vouloir automatiser ce qui est simple, mais qui l'était également pour l'opérateur, et à lui laisser ce qui est trop complexe, en l'ayant parfois complexifié davantage du fait des effets néfastes parfois introduits par l'automatisation (perte de compétence, opérateur en dehors de la boucle, contentement). Ainsi il ne faudrait pas non plus que le développement croissant des assistances conduise vers la situation paradoxale d'automatisation de l'activité routinière de conduite (autorité à la machine) avec basculement de l'autorité vers le conducteur lorsque la situation devient trop complexe. Les difficultés de reprise en main seraient alors trop importantes et les questions juridiques de type responsabilité deviendraient particulièrement cruciales.

10.2 Perspectives

Les résultats obtenus nous ont donc permis de tirer des conclusions pratiques en termes d'efficacité des dispositifs d'assistance considérés, mais également plus fondamentales concernant les comportements des individus en situation de coopération homme-machine.

Tout d'abord, du point de vue de la psychologie ergonomique, nous pensons que **les recherches visant à étudier des tâches très sensori-motrices mériteraient d'être davantage prise en compte par la communauté**. L'opérateur n'est pas toujours qu'un superviseur, nous avons vu que nombre d'activités sont gérées par des routines. Si nous souhaitons progresser dans la conception des systèmes homme-machine, il est donc nécessaire d'étudier précisément la façon dont les opérateurs vont intégrer l'intervention d'automates dans des activités dans lesquelles les routines, et leur contrôle, jouent un rôle important. C'est pas exemple le cas du pilotage d'avion de chasse dans lequel les capacités humaines d'adaptation restent encore inégalables par les machines.

Pour ce qui est des visées applicatives des dispositifs que nous avons étudiées, nos recherches nous ont conduit à penser que la solution proposée par le dispositif d'amorçage moteur n'est pas une solution à privilégier pour une introduction dans les véhicules automobiles tant que **la question du seuil de déclenchement ne sera pas résolue**. Dans nos travaux, nous nous sommes centré sur le contrôle de l'activité, et, pour ce dispositif, nous avons spécifiquement étudié son utilité. Les résultats sont plutôt intéressants à ce niveau, mais si le réglage du seuil de déclenchement était suffisant pour nos recherches, il ne l'était certainement pas pour une situation réelle de conduite.

Un autre aspect, celui de **la discrimination des différentes informations haptiques**, devra également être étudié avant une diffusion sur véhicule réel. En situation de conduite réelle les conducteurs perçoivent des informations dans le volant qui proviennent du contact entre la voiture et la route, telle que l'état de la chaussée. Ces informations vont alors se mélanger dans le volant avec les informations délivrées par l'amorçage moteur et un travail conséquent est encore nécessaire afin d'étudier la façon dont le conducteur va pouvoir discriminer ces différentes informations.

Pour ce qui est du contrôle partagé, nous pensons que son introduction peut se faire relativement aisément, tant que son intervention est limitée. Toutefois, dès lors que l'intervention est plus importante, que l'autorité est progressivement basculée vers la machine, les **questions de contexte et d'engagement/désengagement de ce mode de contrôle vont revêtir une importante capitale**.

Enfin, pour terminer, s'il fallait résumer en une phrase l'apport de nos travaux, nous dirions que nos recherches nous permettent de conclure qu'il est possible d'intégrer efficacement l'intervention d'automates dans les boucles de contrôle sensori-motrices à condition que cette intégration respecte certaines précautions. Il s'agira notamment de calibrer finement le degré d'intervention ou la temporalité d'intervention dans ces boucles.

10.3 Références

- Abbink, D., A., Mulder, M., & Boer, E., R. (2011). Haptic shared control: smoothly shifting control authority. *Cognition, Technology & Work*, 14, 19-28.
- Bellet, T., Paris, J.C., Deleurence, P. Bonnard, A., & Moreau, F. (2012). *Analyse de sorties de voies observées en conditions réelles de conduite* (Rapport de Recherche PARTAGE L.3.3.5). Lyon, France : IFSTTAR, LESCOT.
- Mars, F., Saleh, L., Chevrel, P., Claveau, F., & Lafay, J.F. (2011). Modelling the visual and motor control of steering with an eye to shared-control automation. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 55th Annual Meeting – 2011* (pp. 1422-1426). ISBN: 978-0-945289-39-5
- Young, M.S., Stanton, N.A., & Harris, D. (2007). Driving automation: learning from aviation about design philosophies, *International Journal of Vehicle Design*, 45, 323–338.

Bibliographie générale

- A -

- Abbink, D., A., & Mulder, M. (2010). Neuromuscular analysis as a guideline in designing shared control. *Advances in Haptics*, 109, 499–516.
- Abbink, D., A., Mulder, M., & Boer, E., R. (2011). Haptic shared control: smoothly shifting control authority. *Cognition, Technology & Work*, 14, 19-28.
- Amalberti, R. (1996). *La Conduite des systèmes à risque*, Coll. Le Travail Humain, Paris, Presses Universitaires de France.
- Anderson, J.R., Bothell, D., Byrne, M.D., Douglass, S., Lebiere, C., & Quin, Y.L. (2004). An integrated theory of the mind. *Psychological Review*, 111, 1036-1060.
- Authié, C. (2011). *Contrôle visuel du déplacement en trajectoire courbe : approche sensorimotrice du rôle structurant du flux optique*. Thèse, Université de la Méditerranée Aix-Marseille, France.
- Azzi, S., Reymond, G., Mérienne, F. & Kemeny, A. (2011). Eco-driving performance assessment with in-car visual and haptic feedback assistance. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 11, 041005.

- B -

- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19, 775–779.
- Bainbridge, L. (1987). Ironies of automation. In J. Rasmussen, K.D. Duncan, & J. Leplat (Eds.), *New technology and human error* (pp. 271-284). Chichester, UK: Wiley.
- Bainbridge, L. (1989). Development of Skill, Reduction of Workload. In : L. Bainbridge and S.A. Ruiz Quintanilla, Eds, *Developing Skills with Information Technology* (pp. 87-116). Chichester: Wiley.
- Baldwin, C., L. (2011). Verbal collision avoidance messages during simulated driving perceived urgency, alerting effectiveness and annoyance. *Ergonomics*, 54, 328-337.
- Bellet, T., Paris, J.C., Deleurence, P. Bonnard, A., & Moreau, F. (2012). *Analyse de sorties de voies observées en conditions réelles de conduite* (Rapport de Recherche PARTAGE L.3.3.5). Lyon, France : IFSTTAR, LESCOT.
- Ben-Yaacov, A., Maltz, M., & Shinar, D. (2002). Effects of an in- vehicle collision avoidance warning system on short and long-term driving performance. *Human Factors*, 44, 335–342.
- Beruscha, F., Wang, L., Augsburg, K. & Wandke, H. (2010). Do drivers steer toward or away from lateral directional vibrations at the steering wheel ? Josef Krems, Tibor Petzoldt, Matthias Henning (Eds.) *Proceedings of European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems HUMANIST publications* – Lyon, 2010.

- Beruscha, F., Augsburg, K. & Manstetten, D. (2011). Haptic warning signals at the steering wheel: A literature survey regarding lane departure warning systems, *Haptics The Electronic Journal of Haptics Research*, 4, 16-18.
- Boy, F. & Sumner, P. (2010). Tight coupling between positive and reversed priming in the masked prime paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 36, 892-905.
- Broadbent, D.E. (1957). A mechanical model for human attention and immediate memory. *Psychological Review*, 54, 205-215.
- Brookhuis, K., A., de Waard, D. & Fairclough, S., H. (2003). Criteria for driver impairment, *Ergonomics*, 46, 433-445.

- C -

- Castelfranchi, C. 1998, Modelling social action for agents. *Artificial Intelligence*, 103, 157-182.
- Cellier, J.M., De Keyser, V., & Valot, C. (1996) *La gestion du temps dans les environnements dynamiques*, Paris : PUF.
- Cooke, J.D. (1980). The organization of simple, skilled movements, In: G.E Stelmach, J. Requin (eds.), *Tutorials in motor behaviour* (pp. 199-212). North-Holland Publishing Company, Amsterdam.
- Coutton-Jean, C., Mestre, D.R., Goulon, C., & Bootsma, R.J. (2009). The role of edge lines in curve driving. *Transportation Research Part F*, 12, 483-493.

- D -

- de Rosario, H., Louredo, M., Díaz, I., Soler, A., Juan Gil, J., Solaz J.S. & Jornet, J. (2010). Efficacy and feeling of a vibrotactile frontal collision warning implemented in a haptic pedal. *Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour*, 13, 80-91.
- Deborne, R., (2009). Modélisation de l'adaptation des conducteurs au comportement du véhicule et expérimentations sur simulateur. *Thèse de doctorat*. Ecole centrale de Paris.
- Denoual, T., Mars, F., Petiot, J.F., Reymond, G., & Kemeny A. (2011). Drivers' perception of loss of adherence in bends: influence of motion rendering. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 11, 041004 (7 pages). Available from: <http://dx.doi.org/10.1115/1.3622752> [Accessed 11 October 2011]
- Deroo, M., Hoc, J.M. & Mars, F. (2012). Influence of risk expectation on haptically cued corrective manoeuvres during lane departure. *Ergonomics*, 55, 465-475.
- Dijksterhuis, C., Brookhuis, K.A., & De Waard D. (2011). Effects of steering demand on lane keeping behaviour, self-reports, and physiology. A simulator study. *Accident Analysis and Prevention*, 43, 1074-1081.
- Donges, E. (1978). A two-level model of driver steering behaviour. *Human Factors*, 20, 691-707.
- de Winter, J.C.F., & Dodou, D. (2011). Preparing drivers for dangerous situations: A critical reflection on continuous shared control. In: *IEEE proceedings of the IEEE SMC conference*, Anchorage, Alaska, USA.

- E -

- Eimer, M. & Schlaghecken, F. (2003). Response facilitation and inhibition in subliminal priming. *Biological Psychology*, 64, 7–26.
- Emken, J.L., Benitez, R., Sideris, A., Bobrow, J.E., & Reinkensmeyer D.J. (2007). Motor adaptation as a greedy optimization of error and effort. *Journal of Neurophysiology*, 97, 3997-4006.
- Endsley, M.R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, 37, 32–64.
- Endsley, M., & Kaber, D.B. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, 42, 462-492.

- F -

- Feygin, D., Keehner, M., & Tendick, R. (2002). Haptic guidance: experimental evaluation of a haptic training method for a perceptual motor skill. *Proceedings 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and teleoperator systems. HAPTICS 2002*, Orland, FL, USA.
- Fitts, P.M. (1951). *Human engineering for an effective air navigation and traffic control system*. Washington, DC: National Research Council.
- Fitts, P.M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47, 381-391.
- Fodor, J. (1983) *The modularity of mind*. MIT/Bradford Books.
- Forsyth, B., & MacLean, K.E. (2006). Predictive haptic guidance: intelligent user assistance for the control of dynamic tasks. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 12, 103–113.
- French, D. J., West, R. J., Elander, J., & Wilding, J. M. (1993). Decision-making style, driving style, and self-reported involvement in road traffic accidents. *Ergonomics*, 36, 627-644.

- G -

- Godthelp, H., Milgram, P., & Blaauw, G. J. (1984). The Development of a Time-Related Measure to Describe Driving Strategy. *Human Factors*, 26, 257-268.
- Gray, R., & Regan, D. (2000). Risky driving behavior: a consequence of motion adaptation for visually guided motor action. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26, 1721-1732.
- Griffiths, P.G., & Gillespie, R.B. (2005). Sharing control between humans and automation using haptic interface: primary and secondary task performance benefits. *Human Factors* 47, 574–590.
- Guiard, Y. (1983). The lateral coding of rotations: A study of the Simon effect with wheel-rotation responses. *Journal of Motor Behavior*, 15, 331–342.

- H -

- Harris, D., & Harris, F.J. (2004). Evaluating transfer of technology between application areas; a critical evaluation of the human component in the system, *Technology in Society*, 26, 551–565.
- Held, R. (1965). Plasticity in sensory-motor systems. *Scientific American* , 213, 84–94.

- Ho, C., Tan, H., Z., & Spence, C. (2006): The differential effect of vibrotactile and auditory cues on visual spatial attention, *Ergonomics*, 49, 724-738
- Ho, C., Tan, H., Z. & Spence, C. (2006). Assessing the effectiveness of “intuitive” vibrotactile warning signals in preventing front to rear-end collisions in a driving simulator. *Accident Analysis & Prevention*, 38, 988-996.
- Hoc, J.M. (1983). *L'analyse planifiée des données en psychologie*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Hoc, J.M. (1987). *Psychologie cognitive de la planification*. Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble.
- Hoc, J.M. (1996). *Supervision et contrôle de processus*. Grenoble : PUG.
- Hoc, J.M. (2000). From human-machine interaction to human-machine cooperation. *Ergonomics*, 43, 833-843.
- Hoc, J.M. (2001). Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamic situations. *International Journal of Human-Computer Studies*, 54, 509-540.
- Hoc, J.M. (2004). La gestion de situation dynamique. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie* (pp. 517-530). Paris: Presses Universitaires de France.
- Hoc, J.M., Mars, F., Milleville-pennel, I., Jolly, E., Netto, M., & Blosseville, J.M. (2006). Evaluation of human-machine cooperation modes in car driving for safe lateral control in curves: delegation and mutual control modes. *Le Travail Humain*, 69, 155–185.
- Hoc, J.M. & Amalberti, R. (2007). Cognitive Control Dynamics for Reaching a Satisficing Performance in Complex Dynamic Situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1, 22-55.
- Hoc, J.M., Young, M.S. & Blosseville, J. M. (2009). Cooperation between drivers and automation: implications for safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10, 135-160.
- Hoc, J.M., & Chauvin, C. (2011). Cooperative implications of the allocation of functions to humans and machines. (Manuscript submitted for publication).
- Hollnagel, E., & Woods, D.D. (1983). Cognitive systems engineering: new wine in new bottles, *International Journal of Man-Machine Studies*, 18, 583-600.
- Hollnagel, E., & Woods, D.D. (2005). *Joint cognitive systems: patterns in cognitive systems engineering*. CRC Press, Boca Rotan.

- I -

- J -

- Jamet, E., Gavota, M., & Quaireau, C. (2008). Attention guiding in multimedia learning. *Learning and instruction*, 18, 135-145.
- Jonah, B.A. (1997). Sensation seeking and risky driving: a review and synthesis of the literature. *Accident Analysis & Prevention*, 29, 651-665.

- K -

- Kuge, N., Boer, E.R., Yamamura, T., Ward, N.J. & Manser, M.P. (2006). Study on driver's car following abilities based on an active haptic support function. *SAE Technical Paper* 2006-01-0344, doi:10.4271/2006-01-0344.

- Kullack, A., Ehrenpfordt, I., Lemmer, K., & Eggert, F. (2008). ReflektAS: lane departure prevention system based on behavioural control. *IET Intelligent Transport Systems*, 2, 285-293.
- Kullack, A., Ehrenpfordt, I., & Eggert, F. (2010). REFLEKTAS -- Further Tests of a Fast and Reliable Lane Departure Prevention System for Critical Situations. In: *Proceedings of the 16th ITS World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*. Stockholm, Sweden, 6pp.

- L -

- Land, M.F. & Lee, D.N. (1994) Where we look when we steer. *Nature* 369, 742–744.
- Land, M. F., & Horwood, J. (1995). Which parts of the road guide steering? *Nature*, 377, 339-340.
- Lechner D., Delanne Y., Schaefer G., & Schmitt V. (1997). *Méthodologie de validation du logiciel de dynamique automobile CALLAS*. SIA 970202. Congrès SIA Lyon, Avril 1997. Reprinted in *Ingénieurs de l'automobile* N°713, May 1997.
- Lecoutre, B. & Poitevineau, J. (2005). Le logiciel “LePAC”. *La Revue de Modulad*, 33 (whole volume). Available from: <http://www.univ-rouen.fr/LMRS/Persopage/Lecoutre/PubBL.html> [Accessed 3 January 2012] (English version)
- Lee, J. (2006). Human Factors and Ergonomics in Automation Design. In G. Salvendy (Ed.), *Handbook of Human Factors and Ergonomics* (3rd Ed.) (pp. 1570-1590), New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.
- Lewis-Evans, B. & Charlton, S. G. (2006). Explicit and implicit processes in behavioural adaptation to road width. *Accident Analysis & Prevention*, 38, 610-617.
- Luria, AR. (1966). *Higher cortical functions in man*. New York: Basic Books Inc Publishers.

- M -

- Mars, F. (2008). Steering and gaze control modifications from directed or spontaneous use of a visual augmentation cue. In *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings* (pp. 1541-1545). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Mars F., Saleh L., Chevrel P., Claveau F. & Lafay J.F. (2011). Modelling the visual and motor control of steering with an eye to shared-control automation. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 55th Annual Meeting – 2011* (pp. 1422-1426). ISBN: 978-0-945289-39-5
- Michon, J.A. (1979). Dealing with danger. In: *Report of the European Commission, MRC Workshop on Physiological and psychological performance under hazardous conditions*. Gieten, The Netherlands, 23–25 May, 1978, Report VK 79-01, Traffic Research Center, University of Groningen.
- Millot, P. & Lemoine, M.P. (1998). An attempt for generic concepts toward human-machine cooperation. *IEEE SMC*, San Diego, CA, October.
- Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models. What do we know, what should we do? In L. Evans & R. Schwing (Eds.), *Human behavior and traffic safety* (pp. 485-525). Plenum press, New York.

- Minoiu Enache, N. (2008). Assistance préventive à la sortie de voie. *Thèse de doctorat*. Université d'Evry-Val-d'Essone.
- Mestre, D.R. (2004). Activités sensori-motrices: apports de la réalité virtuelle à la psychologie ergonomique. In J.-M. Hoc & F.Darses (Eds.), *Psychologie ergonomique: tendances actuelles* (pp. 201 – 220). Paris : Presses Universitaires de France.
- Morel, G., Amalberti, R., & Chauvin, C. (2008). Articulating the differences between Safety and Resilience: the decision-making process of professional sea fishing skippers, *Human Factors*, 50, 1-16.
- Muir, B.M. (1988). Trust between humans and machines, and the design of decision aids, in E. Hollnagel, G. Mancini and D. D. Woods (eds), *Cognitive Engineering in Complex Dynamic Worlds* (pp. 71-84). London : Academic Press

- N -

- Najm, W. G., Smith, J. D., & Yanagisawa, M. (2007). *Pre-crash scenario typology for crash avoidance research*. (Tech. Rep. DOT-HS-810 767). Washington, DC: National Highway Transportation Safety Administration Research.
- Navarro, J., Mars, F., & Hoc, J. M. (2007). Lateral Control Assistance for Car Drivers: A Comparison of Motor Priming and Warning Systems. *Human Factors*, 49, 950-960.
- Navarro, J. (2009). *Coopération homme-machine en conduite automobile assistée : Contrôle cognitif et contrôle de la trajectoire*. Thèse, Université de Nantes, France. Retrouvé de <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00365077/>.
- Navarro, J., Mars, F., Forzy, J., El-Jaafari, M., & Hoc, J. (2010). Objective and subjective evaluation of motor priming and warning systems applied to lateral control assistance. *Accident Analysis & Prevention*, 42, 904-912.
- Navarro, J., Mars, F., & Young, M.S. (2011). Lateral control assistance in car driving: classification, review and future prospects. *IET Intelligent Transport Systems*, 5, 207-220.
- Norman, D. A. (1988). *The Psychology of Everyday Things*. New York: Basic Books.

- O -

- OCDE (1990). *Adaptations du comportement aux changements dans le système de transports routiers*. Paris: Organisation de coopération et de développement économiques.
- Onimaru, S. & Kitazaki, M. (2010), Visual and tactile information to improve drivers performance. In: *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference (VR)* (pp. 295-296), Waltham, Massachusetts.

- P -

- Parasuraman, R., Molloy, R., & Singh, I.L., (1993). Performance consequences of automation-induced 'complacency'. *International Journal of Aviation Psychology*, 3, 1–23.
- Parasuraman, R., Sheridan, T., & Wickens, C. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 30, 286-297.
- Piaget, J. (1974). *Adaptation vitale et psychologie de l'intelligence*. Paris: Hermann.

- Picard, R.W., Vyzas, E. & Healey, J. (2001). Toward machine emotional intelligence: analysis of affective physiological state. *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 23, 1175–1191.
- Philip, P. et al. (2003). Effect of fatigue on performance measured by a driving simulator in automobile drivers. *Journal of Psychosomatic Research*, 55, 197-200.
- Pompanon, C. (2009). *De la perception de l'action: Modélisation et simulation de la détection de conflit sur radar chez les contrôleurs aériens "en-route" dans l'architecture cognitive ACT-R*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- Prochazka, A., Clarac, F., Loeb, G.E., Rothwell, J.C. & Wolpaw, J.R. (2000). What do reflex and voluntary mean? Modern views on an ancient debate. *Experimental Brain Research*, 130, 417-432.

- Q -

- R -

- Rabardel, P., & Béguin, P. (2005). Instrument mediated activity: from subject development to anthropocentric design. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 6, 429-461.
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction*. Amsterdam: Elsevier.
- Reason, J. (1993). *L'erreur humaine* (J. M. Hoc). Paris : Presses Universitaires de France. (ouvrage original paru en 1990).
- Reinkensmeyer, D.J., & Patton, J.L. (2009). Can robots help the learning of skilled actions? *Exercise and Sports Sciences Reviews*, 37, 43-51.
- Reymond, G., Kemeny, A., Droulez, J., & Berthoz, A. (2001) Role of lateral acceleration in curve driving: driver model and experiments on a real vehicle and a driving simulator. *Human Factors*, 43, 483–495
- Rouanet, H. & Lecoutre, B. (1983). Specific inference in ANOVA: from significance tests to Bayesian procedures. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 36, 252–268.
- Rouanet, H. (1996). Bayesian methods for assessing importance of effects. *Psychological Bulletin*, 119, 149–158.
- Rumar, K. (1985). The role of perceptual and cognitive filters in observed behaviour. In L. Evans and R. C. Schwing (Eds.), *Human Behaviour and Traffic Safety* (pp. 151-165). Plenum Press, New York.

- S -

- Saad, F. (2006). Some critical issues when studying behavioural adaptations to new driver support systems. *Cognition, Technology & Work*, 8, 175–181.
- Saleh, L., Chevrel, P., & Lafay, J.F. (2010). Generalized H2-preview control and its application to car lateral steering. In *Proceedings IFAC Time Delay Systems 2010* (pp. LS 796), Praha, Czech Republic, (2010-06-07).
- Saleh, L., Chevrel, P., Mars, F., Lafay, J.F., & Claveau, F. (2011). Human-like cybernetic model for lane keeping. In S. Bittanti, A. Cenedese, S. Zampieri (Eds.), *Proceedings of the 18th IFAC World Congress*, (pp. 4368-4373). ISBN: 978-3-902661-93-7

- Saleh, L. (2012). *Contrôle partagé d'un véhicule automobile*. Thèse, Ecole Centrale de Nantes, France.
- Salvucci, D.D. (2001). Predicting the effects of in-car interface use on driver performance: An integrated model approach. *International Journal of Human- Computer Studies*, 55, 85-107.
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing. I. Detection, search, and attention. *Psychological Review*, 84, 1-66.
- Senders, J., Kirstofferson, A., Levison, W., Dietrich, C., & Ward, J. (1967). The attentional demand of automobile driving. *Highway Research Record*, 195, 15-33.
- Sivak, M. (1996). The information that drivers use: Is it indeed 90% visual? *Perception*, 25, 1081-1089.
- Shadmehr, R., & Brashers-Krug, T. (1997). Functional stages in the formation of human long-term motor memory, *The Journal of Neuroscience*, 17, 409-419.
- Sheridan, T. B., & Verplanck, W. L. (1978). *Human and computer control of undersea teleoperators*. Cambridge, MA: MIT, Man Machine Systems Laboratory.
- Sheridan, T. B. (1992). *Telerobotics, automation, and human supervisory control*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Stanley, L.M. (2006) *Haptic and auditory interfaces as collision avoidance technique during roadway departures and driver perception of these modalities*. Doctoral dissertation, Montana state university, Montana.
- Stanton, N.A., & Young, M.S. (1998). Vehicle Automation and Driving Performance, *Ergonomics*, 41, 1014-1028.
- Summala, H., Nieminen, T., & Punto, M. (1996). Maintaining lane position with peripheral vision during in-vehicle tasks. *Human Factors*, 38, 442-451.
- Sumner, P. (2007). Negative and positive masked-priming-Implications for motor inhibition. *Advances in Cognitive Psychology*, 3, 317-326.
- Suzuki, K., & Jansson, H. (2003). An analysis of driver's steering behaviour during auditory or haptic warnings for the designing of lane departure warning system. *Japan Society of Automotive Engineers Review*, 24, 65-70.
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving : Effects on learning. *Cognitive Science*, 12, 257-285.

- T -

- Tricot, A., & Amadieu, F. (2011). Navigation dans les hypertextes. In J. Dinet & J.M.C. Bastien (Eds.), *L'ergonomie au service de la vie quotidienne* (pp. 167-192). Paris : Hermès.
- Tsimhoni, O., & Green, P.A. (2001). Visual demand of driving and the execution of display-intensive in-vehicle tasks. In *proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 45th Annual Meeting* (pp. 1586-1590). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics society.

- U -

- UNECE. (2007). *Statistics of Road Traffic Accidents in Europe and North America*, 51st ed. UNECE, Geneva, 46-61.

- V -

- Van Daele, A., & Carpinelli, F. (2001). La planification dans la gestion des environnements dynamiques : quelques apports récents de la psychologie ergonomique. *Psychologie Française*, 46, 143-152.
- van der Horst, R. (2004). Occlusion as a measure for visual workload: an overview of TNO occlusion research in car driving. *Applied Ergonomics*, 35, 189-196.
- Van der Hulst, M., Rothengatter, T., & Meijman, T. (1998). Strategic adaptations to lack of preview in driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 1, 59-75.
- Varela, F. (1989). *Invitation aux Sciences Cognitives*. Editions du Seuil, Paris.
- Vercher, J.L., Sares, F., Blouin, J., Bourdin, C., & Gauthier G. (2003). Role of sensory information in updating internal models of the effector during arm tracking. *Progress in Brain Research*, 142, 203-222.
- Vergnaud, G. (1990). Développement et fonctionnement cognitifs dans le champ conceptuel des structures additives. *Développement et fonctionnement cognitifs chez l'enfant, des modèles généraux aux modèles locaux*, (sous la direction de Netchine-Grynberg G.), Paris, Presses Universitaires de France.

- W -

- Wiener (1981). A psychological state characterized by a low index of suspicion. (p. 117). [Wiener, E.L. (1981). Complacency: Is the term useful for air safety? In Proceedings of the 26th Corporate Aviation Safety Seminar (pp. 116-125). Denver: Flight Safety Foundation, Inc.].
- Wiener, E., Kanki, B., & Helmreich, R. (Eds.). (1993). *Cockpit Resource Management*. New York: Academic Press.
- Wilde, G. (1982). Critical issues in risk homeostasis theory, *Risk Analysis*, 2, 249-258.
- Wilson, A.D., Tresilian, J.R. & Schlaghecken, F. (2010). Continuous priming effects on discrete response choices. *Brain and Cognition*, 74, 152-159.
- Wolpert, D.M., Ghahramani, Z., & Jordan, M.I. (1999). An internal model for sensorimotor integration. *Science*, 269, 1880-1882.

- X -

- Y -

- Young, M.S., & Stanton, N.A. (2002). Malleable attentional resources theory: a new explanation for the effects of mental underload on performance. *Human Factors*, 44, 365-375.
- Young, M.S., Stanton, N.A. & Harris, D. (2007). Driving automation: learning from aviation about design philosophies, *International Journal of Vehicle Design*, 45, 323-338.

- Z -

Annexes

Liste des Figures

Figure. 1. Les différents niveaux de contrôle de l'activité présentés par Rasmussen (1983).....	9
Figure. 2. Modèle ACT-R d'Anderson (2004).	10
Figure. 3. Modèle du contrôle cognitif de Hoc et Amalberti (2007).	11
Figure 4. Modèle hiérarchique de Michon (1985) sur la tâche de conduite.	19
Figure. 5. Illustration d'un rehaussement perceptif d'un piéton en bord de voie lors de la conduite de nuit.	31
Figure. 6. Catégorisation des modes de coopération homme-machine (Hoc & Chauvin, 2011).	32
Figure. 7. Schématisation du fonctionnement du système homme-machine lors de la présence de l'amorçage moteur.	37
Figure. 8. Illustration du contrôle partagé.	38
Figure. 9. Schématisation du fonctionnement du système homme-machine en situation de contrôle partagé	39
Figure. 10. Photo du simulateur à base mobile de l'Université de Leeds (Royaume-Uni).	46
Figure. 11. Photo du simulateur à base fixe de l'IRCCyN.	47
Figure. 12. Illustration du rendu de la scène visuelle sur l'écran central.	48
Figure. 13. Illustration of the different degrees of intervention on a driver's cognitive processes with classic LDWS and MP systems.....	58
Figure. 14. Illustration of the four conditions in which MP was active during near lane departure on the right. The MP strength was either 2 N/m (light MP) or 6 N/m (strong MP). MP was oriented toward the lane centre (ipsilateral MP) or toward the side of lane departure (contralateral MP).	61
Figure. 15. The three variables; 1. Steering Reaction Time (SRT); 2. Maximum Steering Wheel Rotation Speed (SWRS); 3. Duration of Lateral Excursion (DLE).	63
Figure. 16. Duration of lateral excursion in bends and in straight lines. Error bars represent standard errors of the means.	63
Figure. 17. Steering reaction times in bends and in straight lines. Error bars represent standard errors of means.	64
Figure. 18. Maximum steering wheel rotation speed in bends and in straight lines. Error bars represent standard errors of means.	65
Figure. 19. Schematic representation of light and strong MP in action during a lane departure to the right. Left: light MP; Right: strong MP	80
Figure. 20. Two levels of induced risk. Left: minor risk; Middle: major risk; Right: traffic cones following major risk induction.	81
Figure. 21. The four variables; 1. Steering Reaction Time (SRT); 2. Peak of Steering Wheel Rotation Speed (SWRS); 3. Steering Wheel Maximum Angle (SWMA); 4. Duration of Lateral Excursion (DLE).	82
Figure. 22. Duration of Lateral Excursion (DLE) in bends (left) and in straight lines (right) as a function of risk expectation. Without: Without assistance; Light: light MP; Strong: strong MP. Error bars represent standard errors of means.	84
Figure. 23. Steering reaction times (SRT) in bends (left) and in straight lines (right) as a function of risk expectation. Without: Without assistance; Light: light MP; Strong: strong MP. Error bars represent standard errors of means.	84
Figure. 24. Peak of Steering Wheel Rotation Speed (SWRS) in bends (left) and in straight lines (right) as a function of risk expectation. Without: Without assistance; Light: light MP; Strong: strong MP. Error bars represent standard errors of means.	85
Figure. 25. Steering Wheel Maximum Angle (SWMA) in bends (left) and in straight lines (right) as a function of risk expectation. Without: Without assistance; Light: light MP; Strong: strong MP. Error bars represent standard errors of means.	85
Figure. 26. Illustration of results. MP has an effect on SRT (reduction), SWRS (increase) and SWMA (increase). Risk expectation has an effect on SWRS (increase) and SWMA (increase for bends only). Situation analysis seemed to modulate the effect of risk expectation on SWMA. These effects	

produced a reduction of the DLE in bends and in straight lines. The global pattern of results suggests that the initiation of movement was determined by subsymbolic control and that the influence of symbolic control by means of supervision of routines progressively increased during the corrective manoeuvre.....	87
Figure. 27. Illustration of the human-machine system during shared control. The automaton give α % of the optimal torque and the driver delivers additional torque; ideally, this should be $100-\alpha$, but it can correspond to a greater, or smaller, value. Dotted lines identify the factors studied (driver's anticipation and α % of the optimal torque).....	102
Figure. 28. Test track (on the left) and screenshots showing visibility (good visibility in the middle and fog on the right). The "D" presented on the circuit represents the starting point. In the screenshots, the blue steering wheel icon was an indicator of the activation of shared control. A speedometer (on the middle and right screenshots) and a speed limit sign (on the middle screenshot) were present in order to assist the drivers in their compliance with the speed instruction.....	104
Figure. 29. Steering wheel reversals and steering effort as a function of the degree of shared control. Error bars represent standard errors of the means.	106
Figure. 30. Lateral position during bends and SD of the lateral position as a function of the degree of shared control. Error bars represent standard errors of the means.	108
Figure. 31. Visual demand as a function of the degree of shared control. Error bars represent standard errors of means.....	110
Figure. 32. Subjective comparison between shared control and driving without assistance in terms of comfort, safety, control of the situation and visual demand. Error bars represent standard errors of means.....	111
Figure. 33. La figure (33A) représente le tracé du circuit utilisé lors des sessions de pratique. Les zones entourées de pointillés sont d'une part une zone urbaine (en haut), une zone avec intersection (en bas). Ces zones ont été retirées des analyses statistiques. La figure 33B) représente le tracé du circuit utilisé lors de la survenue d'évènements critiques. L'éclair représente l'endroit où est survenue la défaillance et la croix représente l'endroit où été situé le contournement. Les D représentent les points de départ des circuits, qui étaient parcourus dans le sens contraire des aiguilles d'une montre.....	125
Figure. 34. Variabilité de la position latérale en fonction du rang et du type de pratique. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.....	127
Figure. 35. Vitesse moyenne en fonction du rang et du type de pratique. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.	128
Figure. 36. Auto-évaluation à propose du désengagement du contrôle symbolique dans la tâche de conduite en fonction du rang et du type de pratique Les barres d'erreur représentent les erreurs types.....	130
Figure. 37. Position latérale maximum durant le contournement (sans assistance à gauche et avec assistance à droite).	131
Figure. 38. Position latérale maximum durant le contournement pour le retest uniquement. Cette figure regroupe donc des informations des 2 graphiques de la figure 37 en ne se centrant que sur le retest.	132
Figure. 39. Position latérale maximum durant la défaillance. Les barres d'erreur représentent les erreurs moyennes.....	133
Figure. 40. Illustration du tableau de bord de la nouvelle Ford Focus, qui intègre les dernières assistances à la conduite disponibles à la vente, telles que la détection des angles morts, des panneaux, ou l'avertissement aux sorties de voie involontaires.....	150

Liste des Tableaux

Tableau 1 - Niveau d'automatisation (LOA – level of automation) proposé par Sheridan et Verplanck (1978).....	27
Tableau 2 - Intervention du contrôle partagé en fonction de l'analyse de la situation réalisée par l'automate.....	39
Tableau 3 - Synthèse des assistances étudiées.....	41
Table 4 - Analyses performed on the Duration of Lateral excursion (DLE).....	64
Table 5 - Analyses performed on the Steering Reaction Time (SRT).....	65
Tableau 6 - Analyses performed on the Steering Wheel Rotation Speed (SWRS).	66
Table 7 - Analyses performed on bends and straight lines.	83
Table 8 - Interventions of shared control depending on situation analysis by the automaton.	100
Table 9 - Modalities of assistance factor.....	103
Tableau 10 - Analyses performed on the Steering wheel reversals and Steering effort.	107
Table 11 - Analyses performed on the Lateral position and the Variability of the lateral position.	108
Tableau 12 - Analyses performed on Visual Demand.	110
Tableau 13 - Analyses performed on the questionnaire.	111
Tableau 14 - Analyses réalisées sur la variabilité du contrôle latéral.	127
Tableau 15 - Analyses réalisées sur le contrôle longitudinal.	129
Tableau 16 - Analyses réalisée sur le questionnaire.	130
Tableau 17 - Contournement durant la conduite sans assistance.....	131
Tableau 18 - Contournement durant la conduite avec assistance.....	132
Tableau 19 - Comparaisons basées sur le retest en fonction de la condition de conduite et du type de pratique réalisée.....	133
Tableau 20 - Analyses réalisées sur la défaillance.....	133

Contrôle cognitif, assistance à la conduite et Coopération Homme-Machine : le maintien sur une trajectoire acceptable et sécurisée

Résumé. Ce travail de thèse utilise le cadre de la Coopération Homme-Machine afin d'étudier l'articulation entre le traitement symbolique (interprétatif) du contexte et le traitement subsymbolique de l'intervention d'assistances à la conduite directement sur le volant. Quatre études expérimentales menées sur simulateur de conduite sont présentées.

Les deux premières études s'intéressent à la capacité des conducteurs à conserver la totale maîtrise du véhicule lorsque l'assistance intervient ponctuellement sur le volant, en cas de risque imminent de sortie de voie (amorçage haptique). Les résultats montrent que seuls les temps de réaction des conducteurs sont entièrement déterminés au niveau sensori-moteur, les processus symboliques intervenant très tôt pour inhiber ou moduler la réponse motrice. Les deux dernières études s'intéressent à la Coopération Homme-Machine lorsque l'intervention de l'automate sur le volant est continue (contrôle partagé). Le degré de partage entre les deux agents et l'adaptation à l'assistance sur le moyen terme ont été étudiés. Les résultats permettent de conclure qu'il est possible d'intégrer efficacement l'intervention des automates dans les boucles de contrôle sensori-motrices à condition que cette intégration respecte certaines précautions. Il s'agira notamment de calibrer finement le degré d'intervention ou la temporalité d'intervention dans ces boucles.

Mots clés : Contrôle cognitif, assistance à la conduite, Coopération Homme-Machine, amorçage haptique, contrôle partagé

Cognitive control, driving assistance and Human-Machine Cooperation: maintaining an acceptable and safe trajectory

Abstract. The work in this thesis employs the Human-Machine Cooperation framework to study the relationship between symbolic (interpretive) processing of the context and subsymbolic processing of the intervention of driving assistance devices that act directly on the steering wheel. Four experimental studies on a driving simulator are presented.

The first two focus on the ability of drivers to remain in full control of the vehicle when the assistance occasionally intervenes on the steering wheel, in case of imminent risk of lane departure (haptic priming). The results show that the driver's reaction times are fully determined at the sensorimotor level. However, symbolic processes are involved as well at a very early stage to inhibit or modulate the motor response. Two other studies focus on Human-Machine Cooperation when the intervention of the device is continuous (shared control). The optimal level of shared control and the medium-term adaptation of the driver to the automation are studied. The results show that it is possible to effectively integrate the intervention of automation into the drivers sensorimotor control loops. However, successful integration requires respecting certain constraints, such as the fine calibration of the level of automation and the timing of the intervention.

Keywords: Cognitive control, driving assistance device, Human-Machine Cooperation, haptic priming, shared control